

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**UKLÁDÁNÍ ELEKTROLÝZOU ZÍSKANÉHO VODÍKU DO
METALHYDRIDOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ**

STORAGE OF HYDROGEN PRODUCED BY ELECTROLYSIS IN A METAL HYDRIDE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Hamřík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Lukáš Hamřík

ID: 211108

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Ukládání elektrolýzou získaného vodíku do metalhydridového úložiště

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte s principem nízkoteplotní elektrolýzy a s funkcí a vlastnostmi membránových elektrolyzérů. Seznamte se s problematikou vodíkových zásobníků se zaměřením na metalhydridové zásobníky vodíku. S využitím komerčně dostupného elektrolyzérů a metalhydridového zásobníku vodíku, které jsou k dispozici na Ústavu elektrotechnologie, sestavte funkční systém. Proměřte základní charakteristiky a navrhnete provozní režim celého zařízení. Výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V rámci teoretické části je tato práce zaměřena na možnosti výroby vodíku z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů, jsou zmíněny jejich výhody a nevýhody. V práci jsou popsány vlastnosti a základní principy několika typů technologií elektrolýzy. Jsou zde uvedeny technologické možnosti ukládání vodíku v plynné, kapalně i pevné fázi, především pak s orientací na ukládání vodíku v metalhydridových úložištích. V praktické části je popsán vodíkový systém, který byl předmětem měření. Jsou zde uvedena bloková schémata a popis realizace zapojení ovládací i měřicí soustavy a je přiblížen způsob čtení a zapisování dat pomocí LabVIEW. Dále jsou popsány výsledné naměřené závislosti teploty a tlaku u metalhydridového úložiště, jejich porovnání s teoretickými poznatky a také dva možné režimy, ve kterých lze sestavený vodíkový systém provozovat.

Klíčová slova

Vodík, technologie výroby vodíku, elektrolýza vody, vodíkové úložiště, metalhydrid, LabVIEW

Abstract

In the theoretical part, this thesis focuses on the possibilities of producing hydrogen from renewable and non-renewable sources, mentioning their advantages and disadvantages. The work describes the properties and basic principles of several types of electrolysis technologies. Technological options for hydrogen storage in the gaseous, liquid and solid phases are listed, in particular with a focus on hydrogen storage in metal hydride storage sites. In practical part, the hydrogen system that was the subject of the measurement is described. Block diagrams and a description of the realisation of control and measurement system engagement are provided, and the method of reading and writing data using LabVIEW is described. The resulting measured temperature and pressure dependencies of the metal hydride storage, their comparison with theoretical knowledge, as well as the two possible modes in which the assembled hydrogen system can be operated are described below.

Keywords

Hydrogen, hydrogen production technologies, water electrolysis, hydrogen storage, metalhydride, LabVIEW

Bibliografická citace

HAMŘÍK, Lukáš. *Ukládání elektrolýzou získaného vodíku do metalhydridového úložiště* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-31].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133349>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Vítězslav Novák.

Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|-----------------------------------|--|
| Jméno a příjmení studenta: | <i>Lukáš Hamřík</i> |
| VUT ID studenta: | <i>211108</i> |
| Typ práce: | <i>Bakalářská práce</i> |
| Akademický rok: | <i>2020/21</i> |
| Téma závěrečné práce: | <i>Ukládání elektrolýzou získaného vodíku do metalhydridového úložiště</i> |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 31. května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Vítězslavu Novákovi Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a věcné připomínky při konzultacích a v průběhu vypracovávání mé bakalářské práce.

V Brně dne: 31. května 2021

podpis autora

Obsah

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 9 |
| SEZNAM TABULEK | 10 |
| ÚVOD | 11 |
| 1. VODÍK | 12 |
| 1.1 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ VÝROBY | 12 |
| 1.1.1 <i>Využití fosilních paliv pro výrobu</i> | 13 |
| 1.1.2 <i>Využití obnovitelných zdrojů pro výrobu</i> | 14 |
| 2. ELEKTROLÝZA VODY | 15 |
| 2.1 MICHAEL FARADAY | 16 |
| 2.1.1 <i>Faradayovy zákony elektrolýzy</i> | 17 |
| 2.2 ALKALICKÁ ELEKTROLÝZA | 18 |
| 2.2.1 <i>Princip funkce</i> | 18 |
| 2.3 ELEKTROLÝZA S MEMBRÁNOU Z PEVNÝCH OXIDŮ | 19 |
| 2.3.1 <i>Princip funkce</i> | 19 |
| 2.4 MIKROBIÁLNÍ ELEKTROLÝZA | 20 |
| 2.4.1 <i>Princip funkce</i> | 20 |
| 2.5 ELEKTROLÝZA S POLYMERNÍ MEMBRÁNOU | 21 |
| 2.5.1 <i>Princip funkce</i> | 21 |
| 2.5.2 <i>Termodynamika článku s polymerní membránou</i> | 22 |
| 3. TECHNOLOGIE AEM..... | 24 |
| 3.1 PRINCIP FUNKCE | 24 |
| 3.2 SROVNÁNÍ AEM A ELEKTROLÝZY S POLYMERNÍ MEMBRÁNOU | 26 |
| 3.3 SROVNÁNÍ AEM A ALKALICKÉ TECHNOLOGIE | 26 |
| 4. ELEKTROLYZÉR ACTA EL100 | 27 |
| 5. VODÍKOVÁ ÚLOŽIŠTĚ | 28 |
| 5.1 UKLÁDÁNÍ VODÍKU V PLYNNÉ FÁZI | 28 |
| 5.2 UKLÁDÁNÍ VODÍKU V KAPALNÉ FÁZI | 29 |
| 5.3 UKLÁDÁNÍ VODÍKU V PEVNÉ FÁZI | 29 |
| 5.3.1 <i>Metalhydridy</i> | 30 |
| 5.4 SROVNÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ | 31 |
| 6. METALHYDRIDOVÉ ÚLOŽIŠTĚ HS760..... | 33 |
| 7. VODÍKOVÝ SYSTÉM..... | 35 |
| 7.1 MĚŘÍCÍ A OVLÁDACÍ SOUSTAVA | 36 |
| 7.2 MĚŘENÍ A ZAPISOVÁNÍ DAT | 37 |
| 7.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY A VÝSLEDNÉ ZÁVISLOSTI | 40 |
| 7.4 CELKOVÁ ÚČINNOST VODÍKOVÉHO SYSTÉMU | 42 |
| 7.5 NÁVRH PROVOZNÍHO REŽIMU | 42 |
| 7.5.1 <i>Režim nabití a následného vybití</i> | 43 |
| 7.5.2 <i>Kontinuální provoz elektrolyzér – palivový článek</i> | 43 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 8. ZÁVĚR..... | 44 |
| LITERATURA..... | 46 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 48 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 50 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Rozdělení technologií výroby vodíku [2] | 12 |
| 2.1 | Alkalická elektrolýza [2]..... | 18 |
| 2.2 | Elektrolýza s membránou z pevných oxidů [2]..... | 19 |
| 2.3 | Mikrobiální elektrolýza [2] | 20 |
| 2.4 | PEM elektrolýza [2]..... | 22 |
| 3.1 | Schematické zobrazení článku AEM [10]..... | 25 |
| 4.1 | Elektrolyzér Acta EL100 [11] | 27 |
| 5.1 | Absorpce a desorpce vodíku do a ze struktury kovu [12]..... | 29 |
| 5.2 | Hmotnostní a objemová kapacita pro ukládání vodíku různými technologiemi [14] | 32 |
| 6.1 | Vodíkové úložiště s přilepeným termočlánkem v laboratoři na UETE | 33 |
| 6.2 | Nabíjecí limity úložiště HS760 (závislost tlaku na teplotě) [16] | 34 |
| 7.1 | Vodíkový systém | 35 |
| 7.2 | Blokové schéma vodíkového systému | 35 |
| 7.3 | Schéma zapojení ovládání a měření | 36 |
| 7.4 | Ovládací krabice pro ventily a senzory..... | 37 |
| 7.5 | Program pro měření – záložka nastavení měření | 38 |
| 7.6 | Program pro měření – záložka měření..... | 39 |
| 7.7 | Závislost tlaku v úložišti na teplotě úložiště při nabíjení..... | 40 |
| 7.8 | Závislost tlaku v úložišti na teplotě úložiště při vybíjení | 41 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Technologie výroby vodíku z neobnovitelných zdrojů [2] | 13 |
| 1.2 | Technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů [2]..... | 14 |
| 4.1 | Specifikace elektrolyzéru ACTA EL100 [11]..... | 27 |
| 6.1 | Specifikace úložiště HS760 [16] | 33 |

ÚVOD

Elektrická energie je součástí našeho každodenního života a je potřeba k téměř všem lidským aktivitám, proto je považována za samozřejmost i v dnešní době, kdy je energetická krize na vzestupu. Přes 80% globálně spotřebovávané elektrické energie je vyrobeno z neobnovitelných zdrojů jako je ropa, zemní plyn nebo uhlí. Zvyšující se počet obyvatel a touha po vyšším standardu žití má za následek čím dál více se zvyšující poptávku po energii již od roku 1950. Vzhledem k tomu že zásoby neobnovitelných zdrojů nejsou neomezené a při jejich využití vznikají škodlivé produkty jako skleníkové plyny, polétavé částice či popel, začíná se energetický sektor orientovat i na využití obnovitelných a bezemisních zdrojů energie, mezi které se řadí i jaderná energetika.

Jednou z možných alternativ je i vodíková energetika, protože při využití vodíku vzniká především jako odpadní produkt voda. Realita je však taková, že přes 90% námi využívaného vodíku je stále vyráběno právě z fosilních zdrojů, a to především pomocí parního reformingu zemního plynu, parciální oxidací ropných frakcí nebo zplyňováním uhlí. I pro výrobu vodíku jsou dostupné technologie pro výrobu z obnovitelných zdrojů, každá z nich má své výhody, tou hlavní je, že tyto technologie jsou buď CO_2 neutrální nebo oxid uhličitý dokonce spotřebovávají. Mají své nevýhody a to povětšinou nízkou účinnost, případně i sezonní dostupnost vstupních surovin. Jedna technologie však svými vlastnostmi a to především těmi kladnými mezi jinými vyniká. Touto technologií je elektrolýza vody. Elektrolýzu lze rozlišit na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Jednotlivé druhy používají různé materiály, fungují na jiném principu, liší se jejich účinnost, bezpečnost použití nebo vstupní náklady. Jednotlivé technologie, jejich výhody, nevýhody a principy jsou podrobněji v této práci přiblíženy. Aktuálně největším problémem této technologie je vysoká cena a problémy s ukládáním elektrolýzou vyrobeného vodíku.

Úložiště vodíku může být různých typů, především podle toho v jakém skupenství je vodík uchováván. Potenciál konvenčních úložišť, ve kterých se vodík uchovává v plynné fázi za vysokých tlaků nebo kapalném stavu za teplot nižších než $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alternativní metody ukládání vodíku například do metalhydridů jsou nadějnou technologií především z hlediska množství uloženého vodíku, avšak jejich vývoj není zdaleka tak pokročilý. Problematika ukládání vodíku do metalhydridů je komplexní záležitostí a je v této práci představena. Odlišné metody ukládání se mezi sebou nedají úplně porovnávat, protože každá metoda má své pro a proti a záleží na konkrétní aplikaci, ve které má být použita.

V praktické části se práce zabývá vytvořením vodíkového systému s funkčním zapojením měřicí a ovládací soustavy, vytvořením měřicího programu pomocí vývojového prostředí LabVIEW a metodou zpracování naměřených dat. Hlavním cílem práce je změření tepelných a tlakových závislostí při nabíjení a vybíjení metalhydridového úložiště, celkové účinnosti vytvořeného vodíkového systému a navržení provozních režimů.

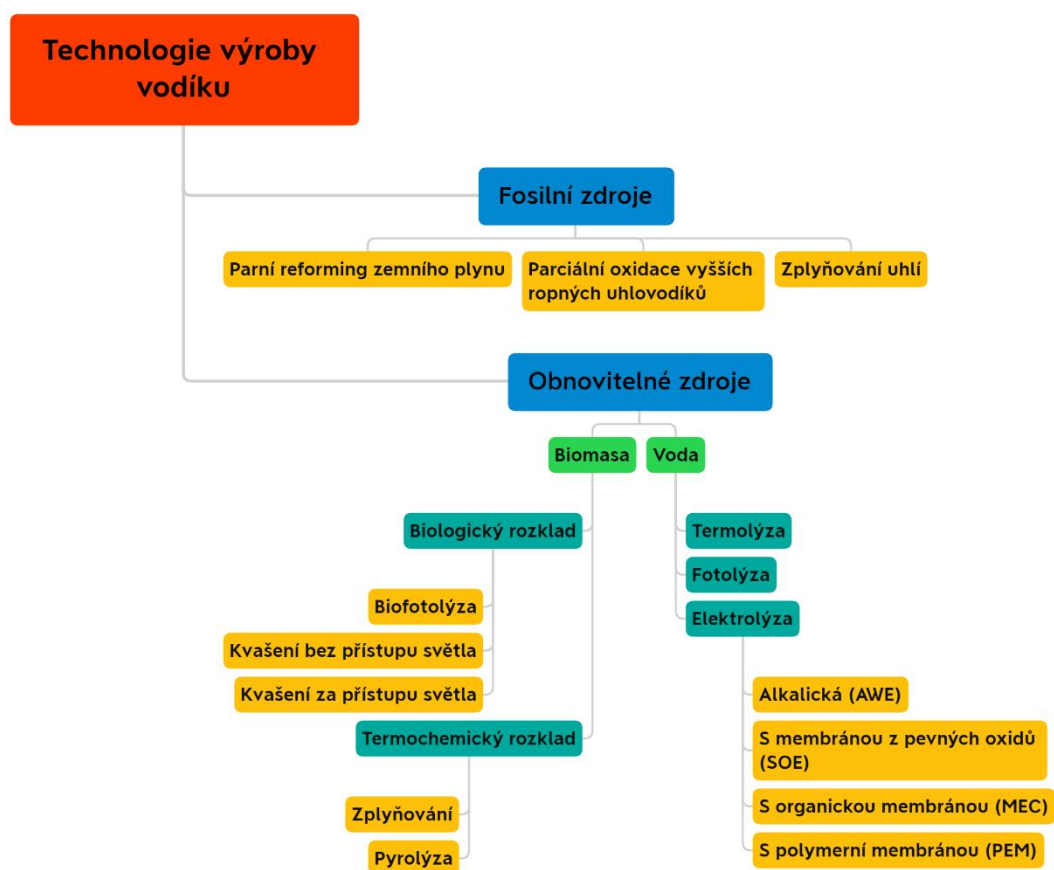
1. VODÍK

Vodík se v plynné formě na Zemi téměř nevyskytuje, proto je nutné ho vyrábět. Z tohoto důvodu nelze na vodík pohlížet jako na zdroj energie, ale pouze jako na nosič energie, do kterého lze primární energii ukládat podobně jako do baterií. Hlavním cílem vodíkové ekonomiky je ukládání energie, případně jeho využívání v různých technologických odvětvích. Jedním z nejvíce spojovaných odvětví právě s vodíkem je doprava, a to i proto, že výrobu vodíku je možné realizovat bez využití fosilních paliv a při jeho využívání vzniká jako vedlejší produkt pouze voda.[1]

I přesto, že je tato práce zaměřena především na výrobu vodíku za pomoci elektrolýzy je vhodné zmínit i další metody pro jeho výrobu.

1.1 Rozdělení technologií výroby

Z obrázku 1.1 je patrné, že technologií pro výrobu vodíku je hned několik. Za základní rozdělení je možné považovat, zda se při výrobě vodíku využívá fosilních paliv či nikoliv.



Obrázek 1.1 Rozdělení technologií výroby vodíku [2]

1.1.1 Využití fosilních paliv pro výrobu

Při využití fosilních paliv mohou být vedlejšími produkty také oxid uhličitý, oxid uhelnatý, těžké oleje nebo ropný koks v závislosti na použité technologii. Na druhou stranu jsou tyto procesy získávání vodíku jedny z nejefektivnějších, účinnost dosahuje přibližně 60-85 %, také cena určitého získaného množství je v porovnání s obnovitelnými zdroji nižší.

Tabulka 1.1 Technologie výroby vodíku z neobnovitelných zdrojů [2]

| Technologie | Výhody | Nevýhody |
|---|--|--|
| Parní reforming zemního plynu | Vyvinutá technologie Existující infrastruktura | Produkce CO, CO ₂ Nestabilní zdroj |
| Parciální oxidace vyšších ropných uhlovodíků | Zavedená technologie | Produkce těžkých olejů a ropného koksu |
| Zplyňování uhlí | Vysoce zavedená technologie Existující infrastruktura | Produkce CO ₂ |

1.1.2 Využití obnovitelných zdrojů pro výrobu

Při použití obnovitelných zdrojů je možné omezit produkci oxidů uhlíku, případně produktů z ropy. Dále je možné tyto technologie využít i jako částečné zpracování odpadů. Ovšem za cenu např. nižší účinnosti technologie, vyšších vstupních nákladů, potřeby slunečního záření, velkých rozměrů technologického zařízení nebo sezonní dostupnosti vstupních surovin.

Tabulka 1.2 Technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů [2]

| Technologie | Výhody | Nevýhody |
|--|---|---|
| Biofotolýza | Spotřeba CO ₂ , produkce O ₂ , funkční v mírných podmínkách | Nízká produkce, potřeba slunečního záření, velký rozměr technologie, vysoká cena, nízká účinnost |
| Kvašení bez přístupu světla | Jednoduchá technologie, CO ₂ neutrální, recyklace odpadu | Nízká produkce, eliminace mastných kyselin, velký rozměr technologie |
| Kvašení za přístupu světla | Recyklace odpadních vod, CO ₂ neutrální | Nízká produkce, potřeba slunečního záření, velký rozměr technologie, nízká účinnost |
| Zplyňování | Dostupné a levné vstupní suroviny, CO ₂ neutrální | Nestabilní produkce z důvodu nečistot ve vstupních surovinách, sezonní dostupnost, tvorba dehtu |
| Pyrolýza | Dostupné a levné vstupní suroviny, CO ₂ neutrální | Nestabilní produkce z důvodu nečistot ve vstupních surovinách, sezonní dostupnost, tvorba dehtu |
| Termolýza | Čistá a udržitelná technologie, produkce O ₂ , využití vody | Vysoké vstupní náklady, toxicita prvků, koroze struktury technologie |
| Fotolýza | Bezemisní technologie, produkce O ₂ , využití vody | Nízká účinnost, neefektivní katalytické materiály, potřeba slunečního záření |
| Elektrolýza | Zavedená a bezemisní technologie, existující infrastruktura, produkce O ₂ , využití vody | Problémy se skladováním a přpravou |

2. ELEKTROLÝZA VODY

Elektrolýza vody je jednou z nejvhodnějších metod výroby vodíku, protože vstupní surovinou je voda a jediným vedlejším produktem je čistý kyslík. Vzhledem k tomu, že elektrolyzátor využívá pro svoji funkci DC napětí, je možné pro jeho napájení využít obnovitelných zdrojů energie jako např. fotovoltaické elektrárny. Z ekonomických důvodů však prozatím množství vodíku vyrobeného pomocí elektrolýzy tvoří cca 4-5% z celkové světové produkce. Očekává se, že množství vodíku vyrobeného elektrolyticky v blízké budoucnosti poroste a to hlavně kvůli požadavkům pro výrobu elektrické energie z obnovitelných (bezemisních) zdrojů (solární, větrná, jaderná).

Elektrolýza vodíku má mnoho výhod (vysoká efektivita článku, produkce velkého množství o vysoké čistotě), které silně převažují nad jejími nevýhodami. [2]

Při procesu elektrolýzy jsou molekuly vody (reaktant) za působení elektrické energie rozděleny na molekuly vodíku (H_2) a molekuly kyslíku (O_2). Elektrolýzu vody lze na základě použitého elektrolytu, operačních podmínek a produkovaných iontů rozdělit na čtyři typy:

- Alkalická elektrolýza (AWE),
- Elektrolýza s membránou z pevných oxidů (SOE),
- Elektrolýza s organickou membránou (MEC),
- Elektrolýza s polymerní membránou (PEM).

2.1 Michael Faraday

Michael Faraday (22.9.1791 – 25.8.1867) byl anglický fyzik a chemik. Narodil se do velmi chudé a nábožensky založené rodiny ve vesničce Newington, o jeho těžkém dětství svědčí i to, že již ve svých dvanácti letech začal pracovat. V roce 1812 začal navštěvovat přednášky známého chemika sira Humpryho Davyho. Ten si všiml Faradayova zájmu o vědu a nadání a rozhodl se udělat z něj jednoho ze svých žáků a vzal ho na cestu po Evropě. V roce 1815 ho Davy zaměstnal jako asistenta v londýnském Královském institutu. I přesto, že neměl žádné matematické vzdělání, těšil se velké popularitě. Díky neustále potřebě nových nápadů se z něj stal jedním z nejlepších experimentátorů. Posluchače, kterým přednášel okouzloval především schopností vyložit i ten nesložitější problém dokonale názorným způsobem. Roku 1820 přednesl svoji první přednášku v Královské společnosti. V roce 1824 se stal členem britské akademie věd, o rok později byl jmenován ředitelem jejich laboratoří. V letech 1830-1851 vyučoval chemii na Královské vojenské akademii ve Woolwichi. V roce 1855 ukončil kvůli zhoršenému zdravotnímu stavu provádění experimentů, přednášel až do roku 1862. O svých experimentech si celý život poctivě vedl podrobné zápisy, které jsou uloženy v archivu Královské společnosti. [3]

Vědecké objevy:

- 1820 – zjistil, že stlačený amoniak (NH_3) v kapalném stavu dokáže při postupném vypouštění odebírat teplo z okolí, objevitel principu moderní klimatizace,
- 1821 – při pokusech zjistil, že elektrický proud procházející vodičem vyvolává magnetické pole,
- 1831 – objev elektromagnetické indukce, důkaz, že elektřina a magnetismus jsou dva různé projevy jednoho jevu – elektromagnetismu,
- 1834 – měřením produktů rozkladu při elektrolýze objevil zákony elektrolýzy, [4]
- Během dvaceti let vypracoval 29 odborných studií, shrnul v nich všechny své hlavní objevy v oblasti elektrotechniky
- Faraday popsal své experimenty v oblasti elektřiny a elektromagnetismu v třísvazkovém díle *Experimental Researches in Electricity* (vydány v letech 1839, 1844 a 1855),
- 40. léta 19. století – vytvořil teorii elektromagnetických polí, která byla založena na zcela novém pojmu elektrických a magnetických siločar,
- Výzkumy v oblasti chemie zaznamenal v díle *Experimental Researches in Chemistry and Physics* (1858).

2.1.1 Faradayovy zákony elektrolýzy

Tyto zákony definují množství látek vyloučených při elektrolýze.

První Faradayův zákon

Hmotnost látky vyloučené na elektrodě závisí přímo úměrně na elektrickém proudu, procházejícím elektrolytem, a na čase, po který elektrický proud procházel.

$$m = A \cdot I \cdot t , \quad (2.1)$$

kde m je hmotnost vyloučené látky, A je elektrochemický ekvivalent látky, I je elektrický proud a t je čas. Tento zákon lze zapsat i ve druhé formě, a to:

$$m = A \cdot Q , \quad (2.2)$$

kde Q je elektrický náboj prošlý elektrolytem. [5][6]

Druhý Faradayův zákon

Látková množství vyloučená stejným nábojem jsou pro všechny látky chemicky ekvivalentní, neboli elektrochemický ekvivalent závisí přímo úměrně na molární hmotnosti látky.

$$m = \frac{M}{F \cdot z} , \quad (2.3)$$

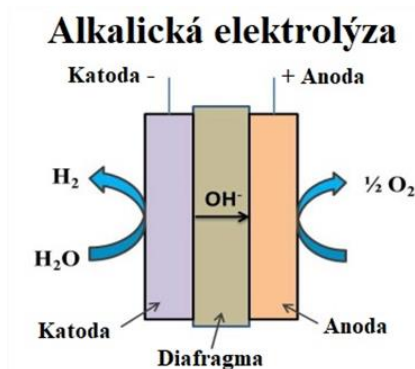
kde M je molární hmotnost látky, F je Faradayova konstanta $F = 9,6485 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$, z je počet elementárních nábojů potřebných k vyloučení jedné molekuly (např. pro iont H^+ je $z = 1$). [5][6]

2.2 Alkalická elektrolýza

Produkce vodíku pomocí alkalické elektrolýzy je pro komerční účely zavedenou technologií až do výkonu jednoho megawattu. Tato technologie byla poprvé představena v roce 1789 německými vědci P. Van Troostwijkem a Diemannem. Alkalická elektrolýza funguje při teplotách 30-80 °C. Hlavními negativními aspekty je omezená proudová hustota (400mA/cm²) a nízký tlak.[2] Alkalická elektrolýza je již komerčně zralou a poměrně levnou technologií. Pro tuto technologii je uváděna účinnost 62 – 82 %. Oproti ostatním metodám elektrolýzy ale produkuje vodík s nejnižší čistotou a je poměrně energeticky náročná.[7]

2.2.1 Princip funkce

Elektrolyt je tvořen roztokem hydroxidu draselného o koncentraci 20-40 % hmotnosti, sloužící k přenosu OH⁻ iontů mezi elektrodami. Elektrody jsou zpravidla tvořeny perforovanou ocelí s katalyzátory na bázi niklu, kobaltu či železa. Elektrodové prostory jsou odděleny diafragmou, aby nedocházelo k mísení plynů – kyslíku a vodíku.[7] Na začátku procesu jsou dvě molekuly hydroxidu na straně katody redukovány na jednu molekulu H₂ a dva hydroxilové ionty OH⁻. Molekula vodíku uniká z povrchu katody a rekombinuje v plynném skupenství, hydroxilové ionty OH⁻ jsou vlivem elektrického pole přitahovány přes perforovanou diafragmu k anodě. Zde dochází k reakci a vzniká jedna molekula H₂O a jeden atom kyslíku. Atomy kyslíku rekombinují na anodě, a vznikají molekuly kyslíku O₂. [2]



Obrázek 2.1 Alkalická elektrolýza [2]

Reakci na anodě lze popsat rovnicí (2.4):



Reakci na katodě popisuje rovnice (2.5):



Reakci na článku vyjadřuje sumární rovnice (2.6):



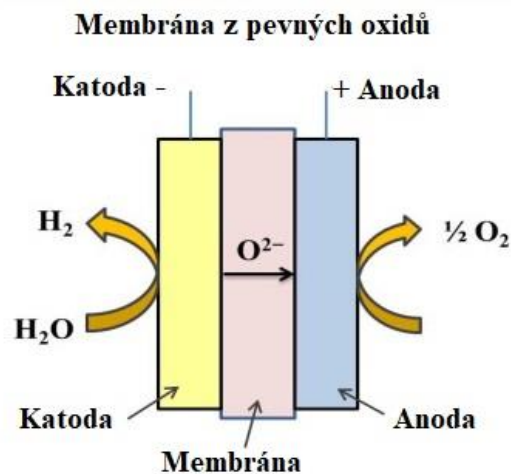
2.3 Elektrolýza s membránou z pevných oxidů

Tato technologie byla poprvé představena v 80. letech 20. století německými vědci W. Dönitzem a E. Erdlem. Tato technologie přilákala mnoho pozornosti a to hlavně kvůli přeměně elektrické energie na chemickou, jakož i díky vysoké čistotě získávaného vodíku s velmi vysokou účinností. Technologie pracuje při vysokém tlaku a vysoké teplotě okolo 500-850°C, jako zdroj využívá vodní páru. Tato technologie není tolik komerčně rozvinutá a to hlavně z důvodu částečné nestability a degradaci materiálů z důvodu vysokých teplot. [2]

2.3.1 Princip funkce

Membrána je povětšinou ze zirkonia stabilizovaného niklem nebo yttriem. V dnešní době se dále využívá i keramických materiálů s protonovou vodivostí. K těmto materiálům se upírá velká pozornost a to hlavně kvůli jejich vysoké účinnosti a velmi dobré vodivosti iontů při teplotách 500-700°C.

Molekula vody je na katodě reakcí rozdělena na molekulu H_2 a O^{2-} . Vodík uniká z elektrody a rekombinuje v plynném skupenství. Ionty kyslíku jsou skrze membránu, za pomoci elektrického pole přitahovány k anodě, následně rekombinují a ve formě molekul opouští povrch anody, opět v plynném skupenství. [2]



Obrázek 2.2 Elektrolýza s membránou z pevných oxidů [2]

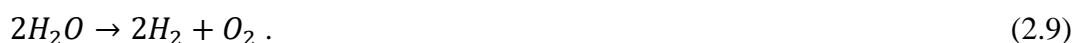
Reakci na anodě lze popsat rovnicí (2.7):



Reakci na katodě popisuje rovnice (2.8):



Reakci na článku vyjadřuje sumární rovnice (2.9):



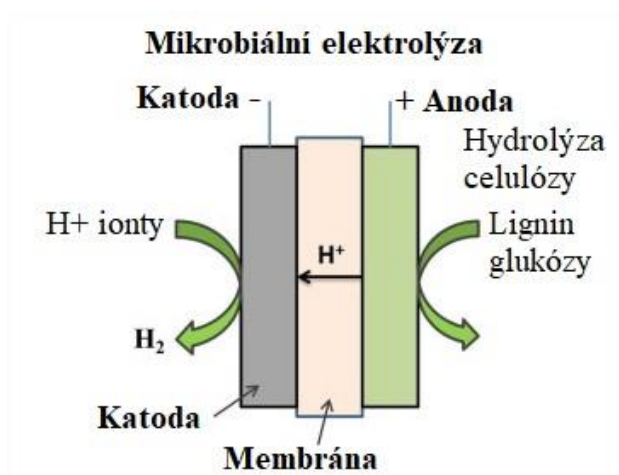
2.4 Mikrobiální elektrolýza

Je to potenciálně atraktivní technologie pro boj s globálním oteplováním a nedostatkem energie. Tento proces využívá elektrochemicky aktivní bakterie k přeměně organické hmoty na vodík nebo další chemické látky, jako jsou např. metan, peroxid vodíku nebo etanol bez jakéhokoli dalšího znečišťování životního prostředí. Technologie je ovšem zatím teprve ve fázi vývoje. Největšími problémy jsou nízká produkce vodíku, vysoký vnitřní odpor, komplikovanost zařízení a využití drahých kovů.

Aby se tato technologie mohla více rozšířit je nutné provést další výzkum a to zejména v oblasti biotechnologie, materiálu elektrod a konstrukci zařízení. [8]

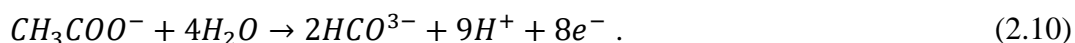
2.4.1 Princip funkce

Na straně anody se nachází substrát (na obrázku níže celulóza), který je bakteriemi rozložen na CO_2 , ionty H^+ a elektrony. Elektrony se přes externí zdroj energie dostávají na katodu, zatímco ionty pronikají ke katodě přes membránu (elektrolyt), na katodě dochází k rekombinaci elektronů a iontů a vznikají molekuly vodíku. Při oxidaci na straně anody vzniká elektrochemický potenciál, tento potenciál však není dostatečný a je tedy vyžadován externí zdroj energie. Napětí z externího zdroje se pohybuje v rozmezí 0,2 – 1 V, v závislosti na použité konstrukci. [2]



Obrázek 2.3 Mikrobiální elektrolýza [2]

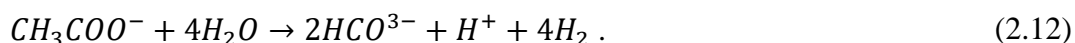
Reakci na anodě lze popsat rovnicí:



Reakci na katodě popisuje rovnice:



Reakci na článku vyjadřuje sumární rovnice:



2.5 Elektrolýza s polymerní membránou

PEM elektrolýzéry jsou co do technologie velice podobné PEM palivovým článkům. Jako elektrolytu je zde využito pevné polymerní membrány. Membrány s protonovou vodivostí vyrobené z materiálu Nafion® nebo fumapem® se prezentují nízkou permeabilitou, vysokou protonovou vodivostí ($0.1 \pm 0.02 \text{ S.cm}^{-1}$), menší tloušťkou (20-300 μm) a možností využití i při vysokých tlacích.

S ohledem na trvalou udržitelnost a vliv na životní prostředí je tato technologie velmi vhodná k využití obnovitelných zdrojů energie pro výrobu vodíku o vysoké čistotě.

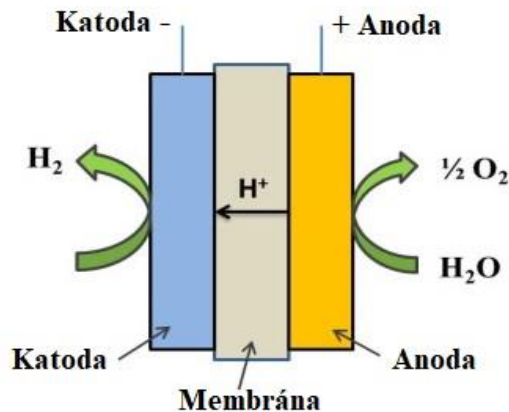
Dalšími výhodami jsou kompaktní design, vysoká proudová hustota (2 A.cm^{-2}), vysoká účinnost, provoz při nízkých teplotách (20-80 °C) a výroba ultra čistého vodíku a kyslíku jako sekundárního produktů. Mnoho výhod s sebou přináší i jisté nevýhody a to především využití drahých a vzácných kovů jako materiálů elektrod. Katoda je nejčastěji vyrobena z platiny (Pt) či palladia (Pd) a anoda z oxidu iridičitého (IrO_2) nebo oxidu rutheničitého (RuO_2). Právě využití těchto kovů má největší důsledek na jednu z nevýhod a tou je vysoká cena v porovnání s alkalickým elektrolýzérem. Proto se i v dnešní době výzkum zaměřuje na snížení ceny při zachování vysoké účinnosti. I přestože je tato technologie stále dále vylepšována, tak je již možné říci, že se jedná o poměrně zralou a komerčně dostupnou technologii. [2]

2.5.1 Princip funkce

Při PEM elektrolýze jsou molekuly vody elektrochemicky rozděleny na vodík a kyslík a to s respektem polaritý elektrod, tedy že vodík je vylučován z katody a kyslík z anody.

Na anodě je rozdělena molekula vody na kyslík (O_2) ionty H^+ a elektrony (e^-). Ionty H^+ procházejí přes membránu s protonovou vodivostí ke katodě, elektrony e^- opouštějí anodu skrze externí napájecí zdroj což má za následek vznik napětí na článku. Na katodě rekombinují ionty H^+ s elektrony, vzniká vodík. [2]

Elektrolýza s polymerní membránou



Obrázek 2.4 PEM elektrolýza [2]

Reakci na anodě lze popsat rovnicí (2.13):



Reakci na katodě popisuje rovnice (2.14):



Reakci na článku vyjadřuje sumární rovnice (2.15):



2.5.2 Termodynamika článku s polymerní membránou

Při procesu elektrolýzy je molekula vody rozdělena na vodík a kyslík, pro toto rozdělení je nutné dodat energii, ovšem zároveň je ekvivalentní energie vyžářena při slučování vodíku a kyslíku v molekulu vody.

Minimální potřebnou energii pro rozdělení molekuly vody lze vypočítat pomocí Gibbsovy volné energie, neboli také volné entalpie. Při standartních podmínkách (teplota $\vartheta = 25^\circ\text{C}$ a atmosférický tlak $p = 101325 \text{ Pa}$) lze Gibbsovu volnou energii pro rozdělení molekuly vody vypočítat pomocí následující rovnice (2.16):

$$\Delta G = n \cdot F \cdot U_{rev} , \quad (2.16)$$

kde n je počet elektronů účastnících se reakce a U_{rev} reverzibilní napětí.

Reverzibilní napětí lze vyjádřit z rovnice (2.16)

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{n \cdot F} . \quad (2.17)$$

Při uvažování standartních podmínek lze využít tabelované hodnoty změny Gibbsovy volné entalpie. Hodnota zapsaná ve (2.18) je platná pro jednu molekulu vody a mění se se stechiometrickým koeficientem uvedeným v reakčních rovnicích.

$$\Delta G = 237,22 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} . \quad (2.18)$$

Tuto hodnotu je možné dosadit do rovnice (2.17), v reakčních rovnicích (2.13),(2.14) a (2.15) je uvažována reakce dvou molekul vody. Je tedy nutné při výpočtu reverzibilního napětí uvažovat stechiometrický koeficient.

$$U_{rev} = \frac{2 \cdot 237,22 \cdot 10^3}{4 \cdot 96485} , \quad (2.19)$$

$$U_{rev} = 1,229 \text{ V} . \quad (2.20)$$

Rozdělením atomu vody, vzniká entropie. Pro výpočet minimálního potřebného napětí k elektrolýze vody je tedy vhodnější užití změny entalpie vody Δi . Změna entalpie při standardních podmínkách je uvedena v (2.21):

$$\Delta i = 285,84 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} . \quad (2.21)$$

Tato hodnota platí pro jednu molekulu vody, je nutné tedy uvažovat stechiometrický koeficient. Pro výpočet minimálního potřebného napětí k elektrolýze je možné upravit vzorec (2.17) a to následujícím způsobem:

$$U_{TN} = \frac{\Delta i}{n \cdot F} , \quad (2.22)$$

kde U_{TN} je termoneutrální napětí. Do (2.22) lze doplnit číselné hodnoty:

$$U_{TN} = \frac{2 \cdot 285,84 \cdot 10^3}{4 \cdot 96485} , \quad (2.23)$$

$$U_{TN} = 1,481 \text{ V} . \quad (2.24)$$

Podle prvního zákona termodynamiky je energie v izolované soustavě stálá a nemůže samovolně vznikat ani zanikat, avšak může měnit svoji formu. Účinnost přeměny energie lze tedy spočítat z množství dodané elektrické energie a získaného množství chemické energie.

Vzhledem k tomu, že při procesu elektrolýzy je voda dodávána do článku v kapalně fázi je možné spočítat účinnost elektrolýzy pomocí vzorce (2.25):

$$\eta = \frac{U_{TN}}{U_{cl}} , \quad (2.25)$$

kde U_{cl} je napětí článku.

Účinnost elektrolyzáru vody je možné vypočítat i za pomoci proudové hustoty. Při nižších proudových hustotách a nižším napětí nárůstá účinnost elektrolyzáru. [2]

3. TECHNOLOGIE AEM

Je technologie vyvinutá společností Acta (nyní působící pod názvem Enapter). Protože se jedná o patentovanou technologii je zdroj informací limitován.

Hlavní součástí elektrolyzátoru je elektrolytický soubor, tvořen z několika článků zapojených do série v bipolárním provedení. Unikátní technologie AEM souvisí se speciální konstrukcí a provozem těchto článků, každý z nich se skládá z membránové elektrodové sestavy, která je složena z polymerní membrány (AEM) a speciálně konstruovaných elektrod. Anodová část článku je naplněna roztokem hydroxidu draselného KOH, zde působícího jako elektrolyt, katodová část je suchá. Kyslík uniká z anodové části článku. Molekuly vodíku vznikají na straně katody, v plynném skupenství vodík uniká přes difúzní vrstvu plynu, je produkován již pod tlakem (typicky 35 barů) a má vysokou suchost a čistotu (99,9%). V případě použití vysoušeče, může čistota vodíku dosahovat až 99,999%. Pro výrobu vodíku je možno využít destilované nebo čištěné dešťové vody či vody z vodovodu. [9][10]

3.1 Princip funkce

Pro popis principu funkce je využito obrázku 3.1. Vodní elektrolyt obsahuje pouze 1% hydroxidu draselného KOH, cirkuluje v anodové části článku a smáčí membránu. Přes membránu pronikají pouze molekuly vody nikoliv však molekuly hydroxidu (na obrázku označeno 1). Molekuly vody jsou na katodě redukovány, vzniká vodík a hydroxilové ionty (na obrázku pod číslem 2). Externí zdroj energie je využit pro vytvoření rozdílu elektrického potenciálu mezi elektrodami a elektrolytem, tento rozdíl potenciálu pak pohání evoluční reakci vodíku popsanou reakční rovnicí na katodě (3.1):



Vytvořený vodík poté uniká přes difúzní vrstvu do výstupního potrubí. Vzniklé hydroxilové ionty OH^- (na obrázku značeno 3) pronikají zpět přes membránu k anodě na které dochází k evoluční reakci kyslíku dle rovnice (3.2):

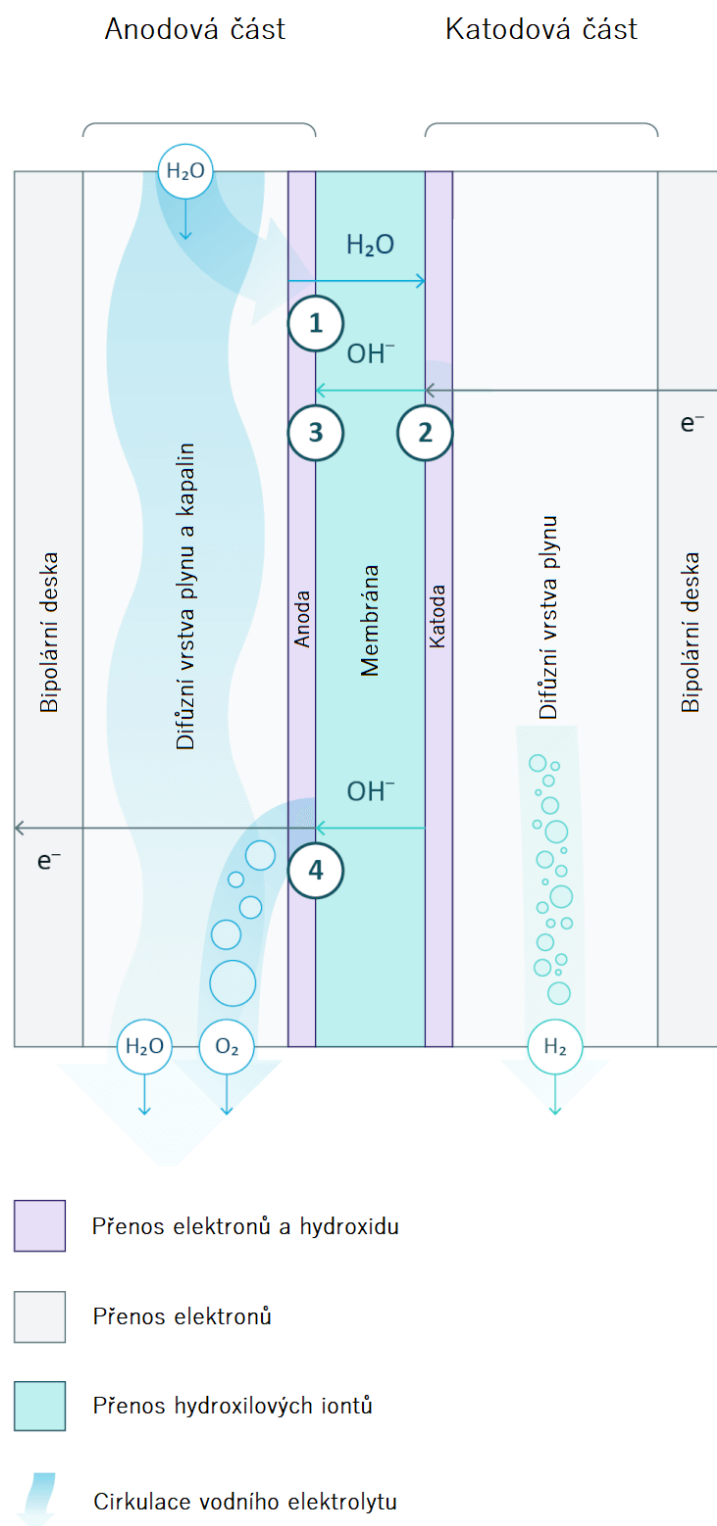


Vzniklý kyslík, uniká přes difúzní vrstvu plynu při cirkulaci elektrolytu (na obrázku jako číslo 4).

Sumární rovnici reakce lze tedy zapsat jako:



Z rovnice (3.3) plyne, že na každé dvě vytvořené molekuly vodíku H_2 připadá jedna molekula kyslíku O_2 . Koncentrace aniontů OH^- je možné zachovat konstantní při konstantní dodávce vody bez dalšího přidávání hydroxidu draselného.



Obrázek 3.1 Schematické zobrazení článku AEM [10]

3.2 Srovnání AEM a elektrolýzy s polymerní membránou

I přestože technologie PEM dosahuje dobré flexibility, nízkých reakčních časů a vysoké proudové hustoty, je důležité vyřešit problémy s extrémní cenou materiálů, které umožňují dlouhou životnost a výkon. Už jen z důvodu velmi kyselého a vysoce korozivního prostředí je nutné využití drahých a vzácných platinových kovů a velkého množství ne zrovna levného titanu.

Technologie AEM je uvažovatelnou alternativou se všemi silnými stránkami technologie PEM a několika přidanými výhodami, které vedou především k nižší ceně. Jednou z největších výhod AEM je, že elektrolýza probíhá v zásaditém prostředí, ve kterém i materiály neobsahující drahé kovy mají vysokou stabilitu a odolnost, proto není využití platinových kovů nutné. Nadále i díky méně korozivnímu prostředí je možné využití nerezové oceli namísto titanu jako bipolárních desek. AEM technologie umožňuje použití vody o menší čistotě než technologie PEM, ta pro svou funkci vyžaduje deionizovanou vodu, v případě AEM postačí voda filtrovaná. [9]

3.3 Srovnání AEM a alkalické technologie

Alkalické elektrolyzéry jsou již komerčně rozvinuté a dostupné. Ovšem špatně reagují na kolísavý zdroj energie a je velice nákladné jejich efektivní napojení na obnovitelné zdroje energie. Vyžadují vysoce koncentrované elektrolytické roztoky a fungují při nízkém tlaku. Vyrobený vodík má nízkou čistotu a je potřebné další čištění a případně stlačování pro získání kvalitního plynu při vyšším výstupním tlaku, proto se tato technologie vyplatí využít spíše pro centralizovanou nebo několika megawattovou výrobu.

AEM technologie staví na výhodách alkalické technologie a vyhýbá se jejím nevýhodám. Méně zásadité prostředí zvyšuje bezpečnost a usnadňuje manipulaci. Je možné využití velmi vlastnostmi podobných kovů pro výrobu mnohem čistšího vodíku s vyšší účinností. Technologii AEM je plně integrovatelná pro použití s obnovitelnými zdroji energie. [9]

4. ELEKTROLYZÉR ACTA EL100

Elektrolyzér nacházející se na Ústavu elektrotechnologie byl vyroben společností Acta (nyní Enapter), konkrétně se jedná o typ EL100. Tento elektrolyzér využívá technologii AEM popsanou v předešlé kapitole. Následující specifikace jsou obsaženy v technické dokumentaci uvedené výrobcem a na výrobních štítcích. [11]

Tabulka 4.1 Specifikace elektrolyzéru ACTA EL100 [11]

| | |
|---|-----------------|
| Množství produkovaného vodíku [l/h] | 100 |
| Pracovní tlak [bar] | 30 |
| Spotřeba vody [l/h] | 0,1 |
| Specifikace vody (vodivost) [$\mu\text{S}/\text{cm}$] | <10 při 25 °C |
| Napájení | AC 230V 50Hz |
| Spotřeba energie [W] | 700 |
| Rozměry (šířka x hloubka x výška) [mm] | 316 x 480 x 433 |
| Hmotnost (bez vody) [kg] | 30 |
| Okolní teplota [°C] | 5 - 40 |
| Relativní vlhkost [%] | 20 – 95 |

Součástí elektrolyzéru je sušička vodíku, která zvyšuje čistotu z původních 99,94% na výstupu elektrolyzéru až na 99,999% což odpovídá stupni čistoty 5.0.



Obrázek 4.1 Elektrolyzér Acta EL100 [11]

5. VODÍKOVÁ ÚLOŽIŠTĚ

Pro efektivní a smysluplné využívání vodíku jako paliva je klíčový vývoj bezpečného, cenově dostupného a energeticky efektivního způsobu jeho uskladnění. Skladování vodíku je komplikováno specifickými obtížemi, jelikož vodík má ze všech paliv nejmenší hustotu, nejmenší atomový poloměr i nejnižší bod varu. V praxi to vše znamená, že vodík díky svým vlastnostem ze skladovacích nádrží buď uniká nebo poškozuje materiál ze kterého jsou nádrže vyrobeny (tzv. vodíkové křehnutí), nebo je pro uskladnění vodíku zapotřebí značné množství energie.

V palivových člancích se používá vždy pouze plyný vodík, avšak jeho skladování je možné jak v plynné, či kapalné, tak i v pevné fázi. Možnosti skladování v různých fázích však otevírá možnosti zvolit ideální technologii na základě konkrétní aplikace, pro kterou je vodík používán. Technologie pro skladování vodíku lze dle stupně výzkumu a vývoje rozdělit na konvenční (fyzikální) a alternativní (chemické).

Ke konvenčním technologiím se řadí tlakové nádoby určené pro skladování plynného vodíku (CGH₂ – compressed hydrogen) a kryogenní nádoby pro zkapalněný vodík (LH₂ – liquid hydrogen). Případně také jejich kombinace, a to především proto, že s rostoucím tlakem roste i bod varu a tím pádem není nutné vodík chladit na tak nízkou teplotu.

Z alternativních technologií skladování je rozšířené skladování vodíku v tzv. metalhydridech, patří sem také další způsoby jako například absorpce v nanostrukturách uhlíku, skleněných mikrokuliček nebo také průmyslová přeměna na jiné chemické látky. [12]

5.1 Ukládání vodíku v plynné fázi

Skldování plynného vodíku je technologicky poměrně jednoduchá záležitost, neboť zde nedochází k žádné fázové přeměně a stačí použít vhodnou nádobu.

Pro statické aplikace, kde není kladen důraz na hmotnost či rozměry zařízení, se obvykle využívají ocelové bezešvé lahve vyrobené z nízkouhlíkaté nebo legované oceli, ty jsou dostupné v objemech až do 50 litrů. [12]

V případě mobilních aplikací je nutné dbát na rozměry a především pak na hmotnost skladovací nádrže (vyšší hmotnost = vyšší spotřeba). Proto se pro mobilní aplikace obvykle používá kompozitních tlakových nádob, které se vyrábí v objemech, od desítek litrů až přibližně do 300 litrů. Typický provozní tlak u takovýchto nádrží je 350 barů, respektive 700 barů při využití např. v automobilech, vyšší tlak znamená menší objem nádrže při zachování stejného uloženého množství. V mnoha aplikacích může být tvar nádoby částečně deformován v závislosti na umístění do úložného prostoru vozidla. Vnitřní povrch kompozitních lahví se obvykle skládá z tenké vrstvy kovu, která zabraňuje úniku plynu a speciálního polymeru. [13]

Ovšem při kompresi je nutné uvažovat zda je stlačování na extrémní tlaky (700 barů a více) rentabilní a to jak z energetického hlediska, tak i toho technologického (parametry nádrže), jako příklad lze uvést, že pro stlačení vodíku na tlak 350 barů je potřebná energie pro stlačení přibližně 30% energie obsažené v palivu. [12]

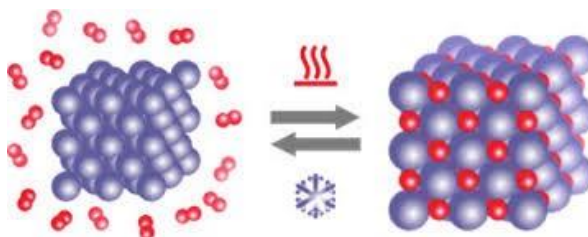
5.2 Ukládání vodíku v kapalně fázi

Běžná fosilní paliva lze skladovat v kapalně fázi za běžných teplot a při nízkých tlacích, načež u kapalně vodíku je nutností teplota – 253 °C a to kvůli nízkému bodu varu. S nízkou teplotou souvisejí zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění. Pro uskladnění v kapalně fázi se používají vícevrstvé nádoby, které mají velmi dobré izolační vlastnosti a s maximálním přetlakem 5 barů. Při skladování vodíku v kryogenních nádobách dochází k postupnému odpařování vlivem přestupu tepla z okolí, čímž se zvyšuje tlak uvnitř nádrže. Přebytný tlak je regulován odpouštěním odpařeného vodíku. U běžně užívaných nádob činí tyto ztráty až 3 % z objemu za den, unikající vodík je jímán a stlačován do přídatných tlakových lahví, které jsou součástí skladovacího systému.

Zkapalňování vodíku je jak technologicky, tak i energeticky náročný proces. Energie nutná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40% energie v kapalně vodíku. I přesto však má tato technologie své uplatnění zejména v transportu vodíku na velké vzdálenosti pomocí nákladních lodí či cisteren. [12]

5.3 Ukládání vodíku v pevně fázi

Systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu nabíjení (absorpce) vodíku do materiálů nebo sloučenin na bázi kovů. Při absorpci vodíku do struktury kovu dochází k oteplení, jedná se tedy o exotermní děj. Opačný děj vybíjení (desorpce), uvolňování vodíku z materiálu je naopak dosaženo dodáním tepla, jedná se o endotermní děj. Sledovanými parametry u těchto systémů jsou tedy především teplota, při které dochází k absorpci a desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní a objemová kapacita absorbátoru a v neposlední řadě i cena a složitost systému. [14]



Obrázek 5.1 Absorpce a desorpce vodíku do a ze struktury kovu [12]

Dělení hydridů:

- **Metalhydridy** – křehké pevné látky kovového vzhledu, tvořeny prvky z podskupin chromu, triády železa nebo palladia, vyznačují se vodivými nebo polovodivými vlastnostmi
- **Alanáty** – sloučeniny na bázi hliníku, mají vysokou hmotnostní i objemovou kapacitu, nevýhodou vysoká cena a vysoká desorpční teplota (nad 150°C)
- **Borohydridy** – komplexní sloučeniny vodíku, vyskytují se v nich kovy, bor a případně prvky alkalických zemin

5.3.1 Metalhydridy

Metalhydridy vznikají při chemické reakci vodíku a kovu. Při procesu ukládání vodíku se molekuly navazují do strukturu kovu při určitém tlaku a teplotě, typicky, avšak ne výhradně, dosahuje tlak hodnot od 3 do 30 barů, což je řádově méně než ve srovnání s tlakovými nádobami. Jednou z velkých nevýhod je vysoká hmotnost, která by ovšem v případě stacionárních úložišť nepředstavovala technické problémy a to především pro úložiště menších rozměrů. Právě kvůli hmotnosti se prozatím neuvažuje využití v mobilních aplikacích, tato situace se ale může změnit a to v závislosti na výzkumu nových, lehčích materiálů.

Materiály pro vznik metalhydridů mohou být jak chemicky čisté kovy, tak i jejich slitiny, a to buď ve formě granulátu nebo částic. Tím je umožněno skladování vodíku při mírných teplotách a tlacích, záleží to ovšem na použitém hydridu. Hlavním důvodem pro další rozvoj těchto druhů úložišť je především schopnost absorbovat obrovské množství vodíku do struktury kovu. Je možné uložit do nádoby o určitém objemu více atomů vodíku, než se nachází ve stejném objemu nádoby vodíku v kapalně fázi, a to protože, když se kov dostane do kontaktu s vodíkem, dochází k absorpci vodíku na povrch kovu, pokud je dále dodáno do systému dostatečné množství energie, rozpadne se molekula vodíku na atomy, které následně difundují a dostávají se do tzv. intersticiálních pozic krystalické mřížky a vzniká pevný roztok, tato fáze se také nazývá fází α . Jak se do systému dodává více energie a zvyšuje se obsah vodíku, dochází k nukleaci hydridové fáze (fáze β), což umožňuje kovu absorbovat vodíkové atomy, nukleace pokračuje až do doby než se kov nasytí vodíkem.

Absorpce vodíku do krystalické mřížky kovu je obvykle doprovázena uvolňováním tepla, čímž je zapříčiněn růst tlaku uvnitř nádoby. Pro uvolnění vodíku z hydridu je však nutno teplo naopak dodat. Tyto procesy jsou kontinuálně opakovatelné. Nabíjení a vybíjení úložiště může být provedeno tolikrát dokud nedorazí ke kontaminaci hydridu.

V dnešní době používané materiály jsou především založeny na bázi slitin kovů s vysokou slučivostí vzhledem k vodíku (typicky především vzácné kovy nebo kovy alkalických zemin jako např. Ca, Ti, Y, Zr, Hf, La, Ce atd.) a kovů s nízkou slučivostí (např. Cr, Mn, Fe, Co, Ni). Jednou z nejvíce zkoumaných slitin je LaNi_5 , která dosahuje dobrých výsledků z hlediska kinetiky systému, tlaku a teploty. Dále lze zmínit slitinu

FeTi, u té však dochází ke vzniku vrstvy oxidu titanu a aktivace materiálu je problematická, což omezuje nabíjecí a vybíjecí množství vodíku bez vyšších teplot a tlaků.

Velice slibných výsledků dosahují hydridy hořčíku, jejich podstatnou výhodou je nízká hmotnost, tepelná odolnost a především nízká cena, na druhou stranu se jedná o vysokoteplotní technologie, které pro absorpci a desorpci vyžadují teplotu až 400 °C, tato skutečnost snižuje jejich účinnost a omezuje možné oblasti použití.

Za poslední tři dekády se výzkum zaměřoval především na zlepšení kinetiky nabíjení a vybíjení metalhydridových úložišť, v této oblasti bylo dosaženo výrazných pokroků a to bez zvyšování teplot. Další rozvoj zahrnuje použití katalyzátorů, vylepšených slitin kovů a nanostruktur.

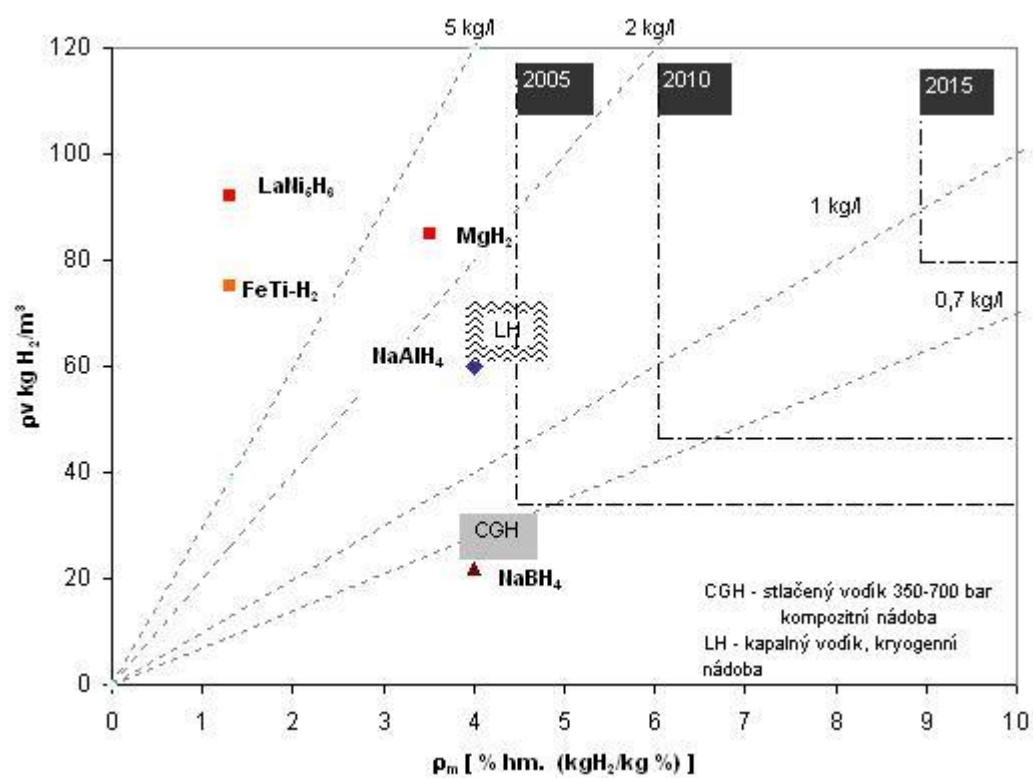
Většina metalhydridových úložišť není schopna uložit obrovská množství vodíku, v opačném případě jsou zatíženy pomalou kinetikou a nejsou schopny uvolňovat vodík při nízkých teplotách. [15]

5.4 Srovnání technologických možností

V současné době představuje skladování vodíku nadále technologickou překážku. Jednotlivé technologie skladování vodíku se nedají mezi sebou snadno porovnat, protože volba typu úložiště bude vždy záležet na konkrétním účelu a aplikaci.

Objemová kapacita systému je u fyzikálních způsobů skladování vodíku limitována hlavně hustotou kapalného či stlačeného vodíku a hmotnostní kapacita úložiště je poté omezena především hmotností skladovacích nádob. Konvenční způsoby skladování vodíku jsou bezpečné a mnoha lety provozu ověřené systémy, jejich technologický potenciál je však již téměř vyčerpán. [12]

Alternativní způsoby skladování vodíků mají naopak značný potenciál a je pravděpodobné, že se v blízké budoucnosti stanou dominantním způsobem ukládání a to především v mobilních aplikacích, v některých oblastech se již začínají prosazovat úložiště na bázi metalhydridů, negativním faktorem je u nich vysoká cena a vyšší hmotnost. [14]



Obrázek 5.2 Hmotnostní a objemová kapacita pro ukládání vodíku různými technologiemi [14]

6. METALHYDRIDOVÉ ÚLOŽIŠTĚ HS760

Vodíkové úložiště nacházející se na Ústavu elektrotechnologie je vyrobeno společností Heliocentris a nese označení HS760. Jedná se o nízkotlaké a nízkoteplotní úložiště. K úložišti je výrobcem dodávána sada pro rychlé připojení do vodíkové soustavy *H₂ Connection Kit 200 bar* a detektor vodíku pro kontrolu pracoviště a měření úniků ze soustavy. [16]

Následující specifikace úložiště v tabulce 6.1 jsou poskytnuty výrobcem a jsou uvedeny v datasheetu:

Tabulka 6.1 Specifikace úložiště HS760 [16]

| | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Specifikace plynu | Suchý vodík, čistota 5.0 nebo vyšší |
| Kapacita úložiště při tlaku 17 bar | 760 l |
| Kapacita úložiště při tlaku 10 bar | ~ 500 l |
| Doporučený nabíjecí tlak | 10 bar při 20 °C |
| Maximální tlak úložiště | 17 bar |
| Rozsah teplot pro započítání nabíjení | 15 až 30 °C |
| Rozměry (průměr x délka) | 89 x 420 mm |
| Hmotnost | 6,5 kg |

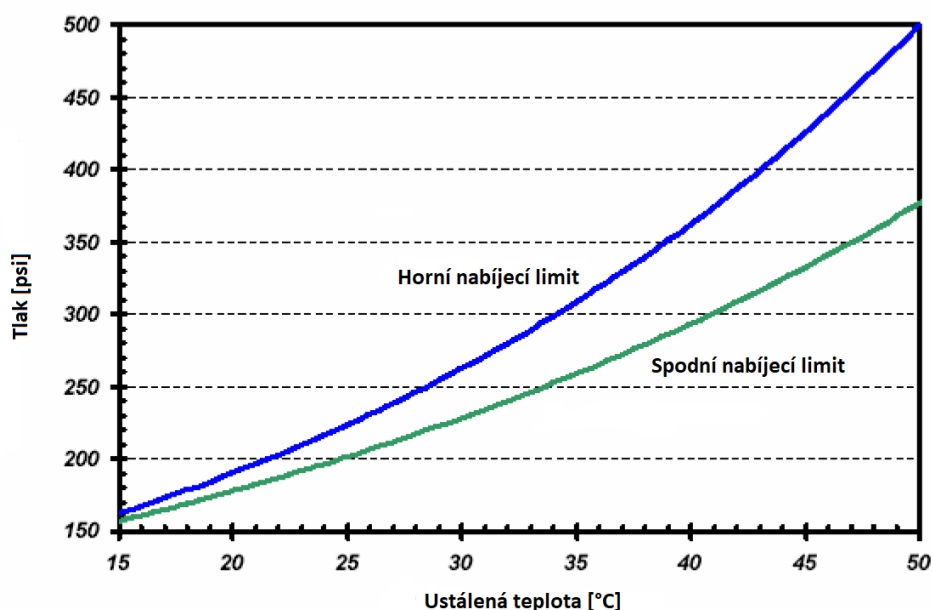


Obrázek 6.1 Vodíkové úložiště s přilepeným termočlánkem v laboratoři na UETE

Z tabulky 6.1 lze odvodit, že parametry úložiště potvrzují teoretické předpoklady, kdy kapacita úložiště je závislá na tlaku vodíku a dobíjecí cyklus může být zahájen pouze za malé tolerance okolních teplot.

V případě, že by došlo k poklesu tlaku na 1 bar je nutné zahájit nabíjení nádoby jinak by mohlo dojít k trvalému poškození úložiště. Pro urychlení cyklu dobíjení je nádobu možné chladit, není to však nezbytné. Maximální teplota úložiště by neměla přesáhnout teplotu 50°C. V případě vybíjení je při větším odebíraném množství vodíku doporučeno nádobě dodávat teplo pro lepší vylučování atomů vodíku z krystalické mřížky kovu.

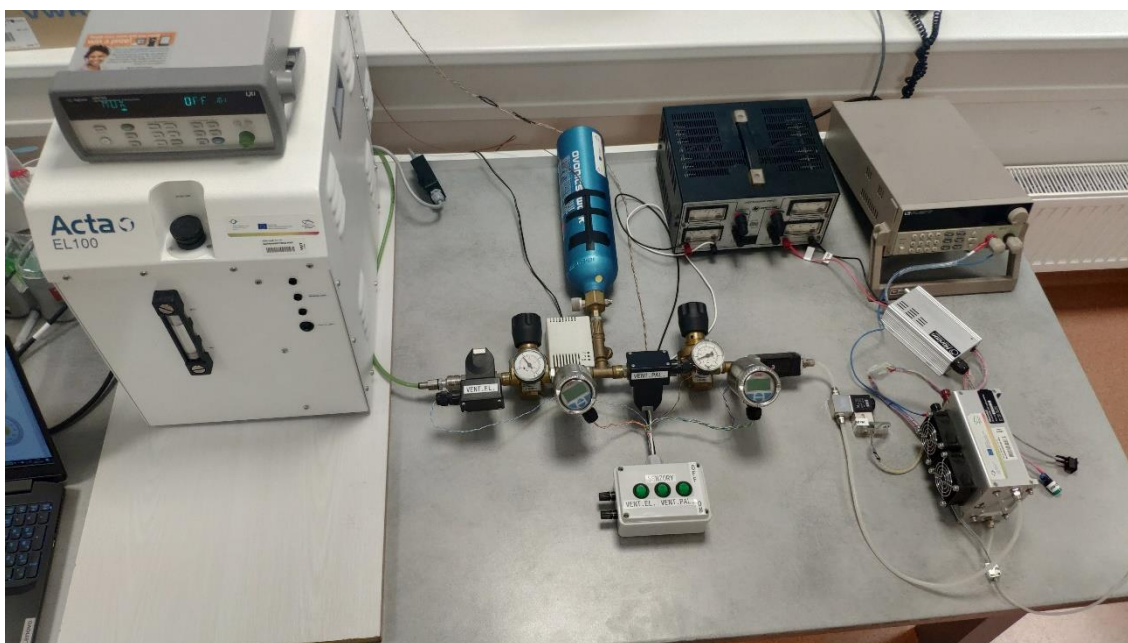
V závislosti na teplotě a úrovni dobítí nádoby je možné dosáhnout různých hodnot tlaku vodíku v nádobě. Limity pro nabíjení při ustálené teplotě jsou vyneseny v následující charakteristice na obrázku 6.2:



Obrázek 6.2 Nabíjecí limity úložiště HS760 (závislost tlaku na teplotě) [16]

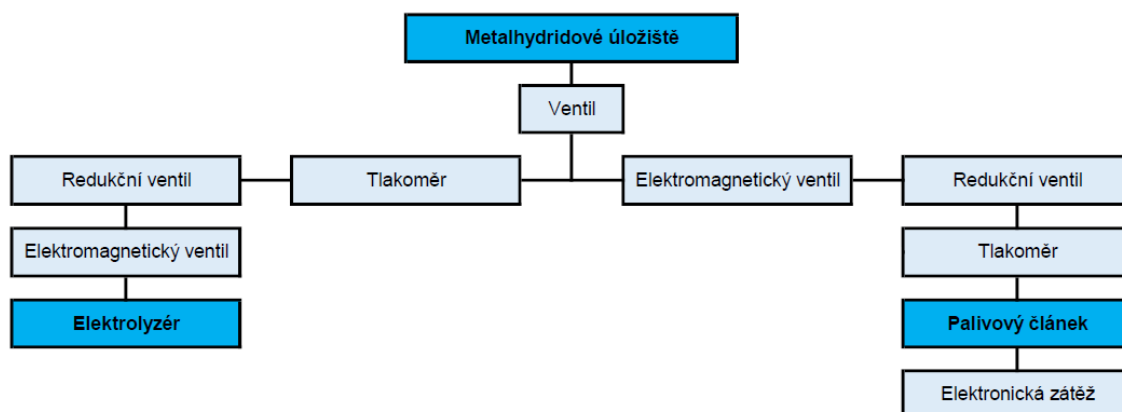
7. VODÍKOVÝ SYSTÉM

Měření probíhalo na vodíkovém systému skládajícího se z elektrolyzáru, metalhydridového úložiště a palivového článku. Kompletní systém na kterém bylo měření realizováno lze vidět na obrázku 7.1 níže.



Obrázek 7.1 Vodíkový systém

Tato práce je především zaměřena na měření v části elektrolyzáru – metalhydridové úložiště, bylo však provedeno i měření zahrnující celý vodíkový systém.

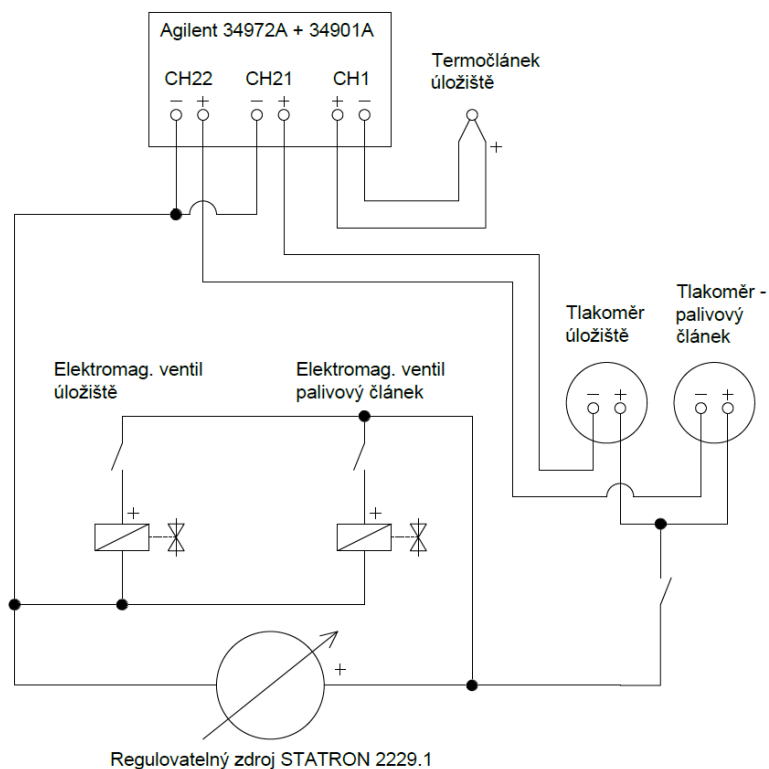


Obrázek 7.2 Blokové schéma vodíkového systému

Na obrázku 7.2 je blokově znázorněno schéma zapojení vodíkového systému. Zdrojem vodíku je v tomto případě elektrolyzátor, který je blíže specifikován v kapitole 4, vzhledem k tomu, že se v rámci měření nepodařilo navázat komunikaci, tak byl uvažován provoz s maximálním výkonem a tudíž i maximální výrobou vodíku v množství 100 litrů za hodinu. Za elektrolyzátor je zapojena soustava armatur, konkrétně elektromagnetický ventil sloužící pro otevírání a uzavírání přívodu vodíku do úložiště, redukční ventil k redukci tlaku vodíku v rámci systému. Tlak lze odečítat přímo na displeji tlakoměru nebo v programu vytvořeném ve vývojovém prostředí LabVIEW. Ventil před úložištěm slouží k uzavření respektive otevření nádoby. Specifikace úložiště jsou uvedeny v kapitole 6.

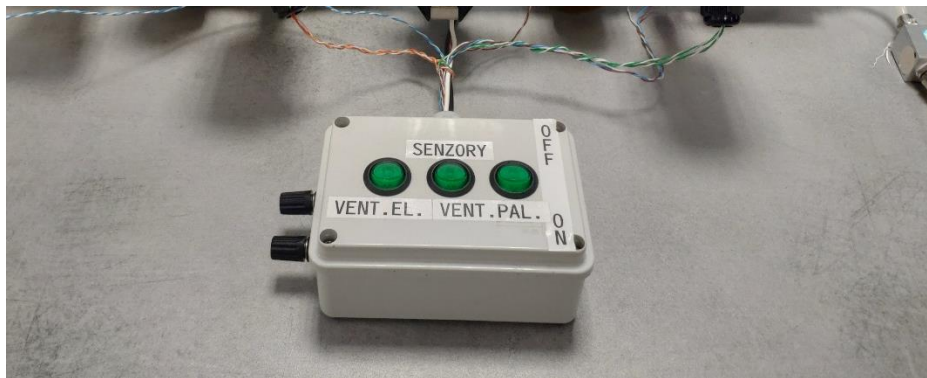
7.1 Měřicí a ovládací soustava

Pro měření byla použita měřicí ústředna Agilent 34972A a multiplexerová karta Agilent 34901A. Teplota metalhydridového úložiště je měřena pomocí termočlánku typu J a měřicí ústředny, která pomocí funkce měření teploty zobrazuje po nastavení typu senzoru přímo naměřenou teplotu. Pro měření tlaků v úložišti a v palivovém článku je využito proudových výstupů jednotlivých tlakoměrů, zapojení bylo provedeno podle pokynů výrobce. Zapojení měřicí a ovládací soustavy je zobrazeno na následujícím schématu 7.3.



Obrázek 7.3 Schéma zapojení ovládací a měřicí soustavy

Napájení měřících prvků a ovládací soustavy je zajištěno regulovatelným stejnosměrným zdrojem STATRON 2229.1, napětí zdroje je nastaveno na hodnotu 24V. Elektromagnetické ventily úložiště i palivového článku lze ručně ovládat kolébkovými spínači. Spínačem lze také vypínat a zapínat napájení obou tlakoměrů. Tlakoměr měřící tlak v úložišti je typu ABB 261GS UKPN21 a tlakoměr měřící tlak do palivového článku je typu ABB 261GS LKPN21. Všechny tři kolébkové spínače jsou umístěny v krabici (na obrázku 7.4 níže).



Obrázek 7.4 Ovládací krabice pro ventily a senzory

7.2 Měření a zapisování dat

Pro měření a zapisování dat byl v rámci této práce a práce na téma *Palivový článek s metalhydridovým úložištěm vodíku* vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW samostatný program pro měření teploty úložiště a tlaků v úložišti a do palivového článku.

Prostředí LabVIEW bylo zvoleno především z důvodu podpory ze strany výrobce měřící ústředny, díky které bylo pro její konfiguraci možné využít tzv. ovladačů Plug & Play, nebylo tedy nutné konfiguraci nijak moc složitě nastavovat. Komunikace mezi ústřednou a počítačem je zajištěna sériovým rozhraním VISA USB, které se používá pro komunikaci s měřící přístroji. Pro čtení dat bylo potřebné nastavit, co se na jakém kanálu multiplexerové karty bude měřit, například pro kanál CH1 (v LabVIEW identifikován číslem 101) bylo nastaveno měření teploty ve stupních Celsia pomocí termočlánku typu J, měření a čtení dat je v programu realizováno pomocí bloků **Trigger**, který sepne nakonfigurovaný kanál a bloku **Read**, který načte hodnotu naměřenou na nakonfigurovaném kanálu. Obdobně je to řešeno i pro kanály CH21 a CH22 s tím, že na těchto kanálech je měřen proud tekoucí tlakoměrem. Aby bylo možné s naměřenými hodnotami dále pracovat, musí být jejich datový typ převeden, blok **Read** totiž výstupní hodnoty vypisuje pouze jako typ **String**, v případě toho programu bylo využito bloku **String to Number** jehož výstupem je číslo s datovým typem **Double**, ten je již možné pomocí matematických funkcí dále zpracovávat. Pro přepočtení proudu na tlak bylo nutné

určit základní rovnice lineárních závislostí tlaku na proudu tlakoměrem, rovnice byly pro oba tlakoměry stanoveny z hodnot uvedených v datasheetech tlakoměrů a proložením těchto závislostí v programu MS Excel.

Rovnice přepočtu proudu na tlak pro tlakoměr, měřící tlak vodíku v úložišti:

$$p = (I \cdot 1000 - 4) \cdot 1,875, \quad (7.1)$$

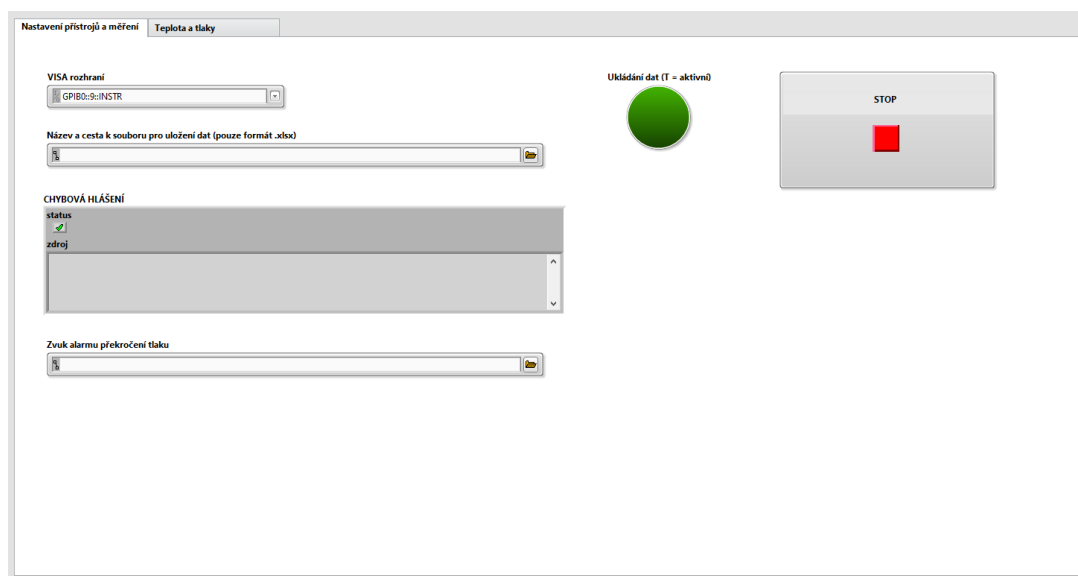
kde p je tlak [bar] a I měřený proud.

Rovnice přepočtu proudu na tlak pro tlakoměr měřící tlak do palivového článku:

$$p = (I \cdot 1000 - 4) \cdot 0,15625. \quad (7.2)$$

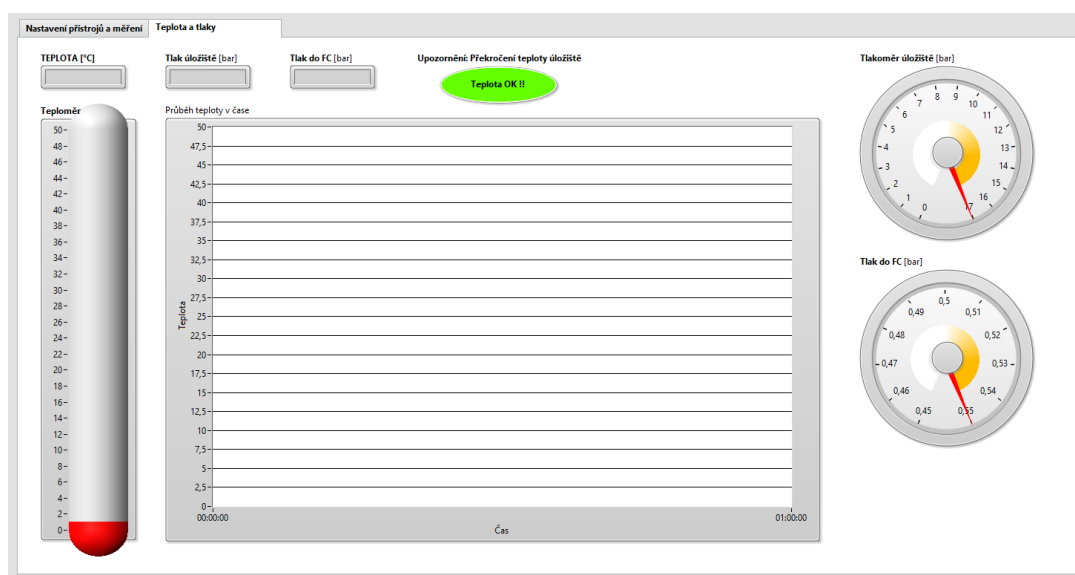
Interval měření byl vzhledem k pomalosti dějů nastaven, tak aby mezi jednotlivými hodnotami naměřenými v rámci jednoho kanálu byl časový rozestup 10 vteřin, interval je pro měření těchto dlouhotrvajících dějů plně dostačující a není nutné ho zkracovat. Mezi čtením jednotlivých kanálů bylo nastaveno odčasování na 2 vteřiny, které slouží pro nastavení, sepnutí a odečtení hodnoty na dalším kanálu. Bez tohoto odčasování nebylo možné zaručit správné čtení hodnot při aktuální kompozici programu. Jedná se tedy o kompromis s tím, aby program načítal správně hodnoty a dokázal je i v požadovaném pořadí zapisovat.

Zapisování dat bylo realizováno pouze pro teplotu úložiště a tlaku v úložišti a to pomocí bloku **Write To Measurement File**, který zapisuje data do zvoleného souboru, v tomto případě do souboru MS Excel *.xlsx. Cestu k souboru pro zapisování je nutno zvolit před začátkem měření v úvodním okně programu - Nastavení přístrojů a měření.



Obrázek 7.5 Program pro měření – záložka nastavení měření

Naměřené hodnoty jsou zobrazovány v grafickém okně vytvořeného programu a to jak v podobě hodnot v jednotlivých jim náležících oknech, tak, v případě teploty i za pomoci teploměru, teplota je také zapisována do grafu v závislosti na čase aby bylo možné pozorovat růst či pokles teploty úložiště při jeho nabíjení či vybíjení, v případě tlaků jsou tyto zobrazovány na ručkových tlakoměrech, data o teplotě a tlacích jsou uváděny na společné záložce v okně programu. V programu je také integrován alarm, který se spustí v případě, že by došlo k překročení výrobcem stanovených hodnot teploty nebo tlaku v úložišti.

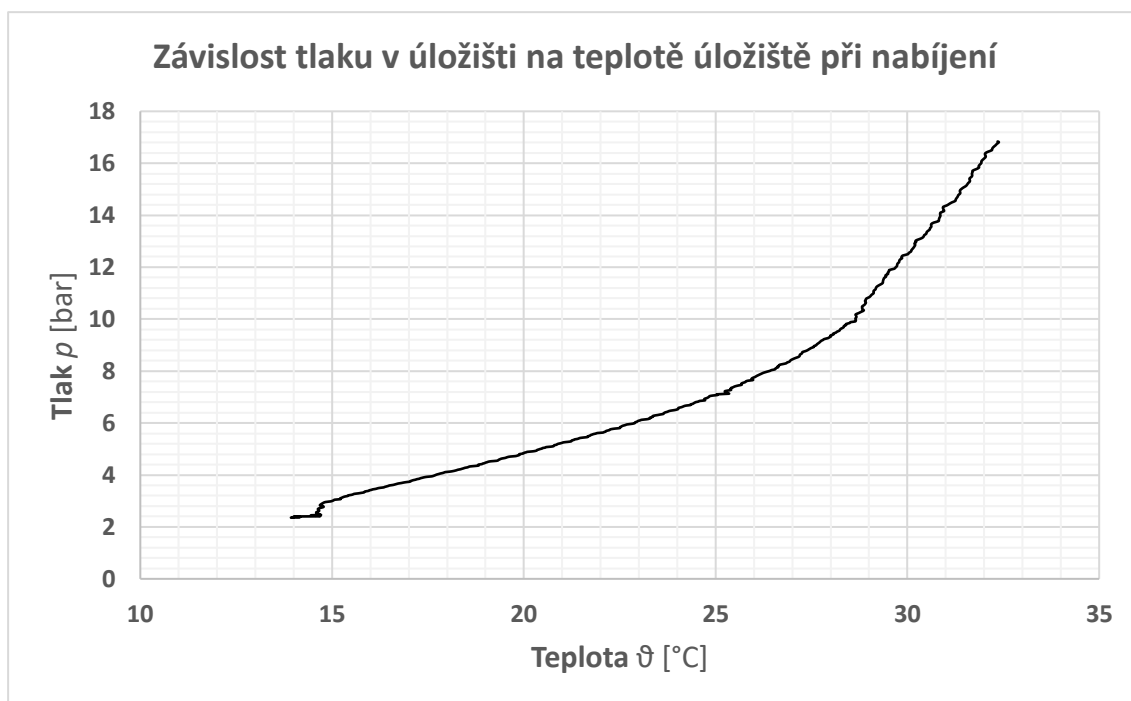


Obrázek 7.6 Program pro měření – záložka měření

Soubor projektu LabVIEW je i se všemi nezbytnými součástmi a zdrojovým kódem vložen v přílohách práce, samostatný program je také vložen v přílohách a to ve složce s názvem **H2_system_v1.5**.

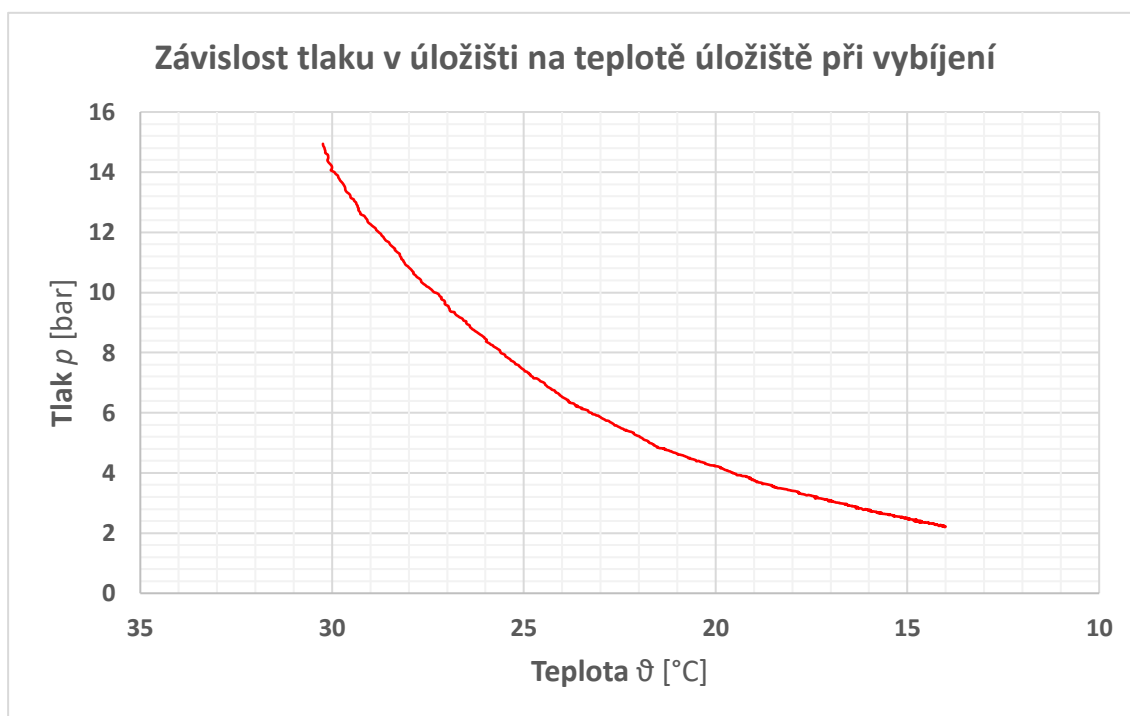
7.3 Naměřené hodnoty a výsledné závislosti

Vzhledem k tomu, že se jednalo o poměrně dlouhé měření s velkým množstvím naměřených hodnot, nebudou hodnoty vloženy do tabulky, která by byla součástí tohoto dokumentu, ale bude na ně odkazováno prostřednictvím souboru *.xlsx vloženého v přílohách.



Obrázek 7.7 Závislost tlaku v úložišti na teplotě úložiště při nabíjení

Ze závislosti na obrázku 7.7 lze vyvodit, že při započetí nabíjení pod doporučenou teplotou nádoby 15°C se úložiště chová výrazně nestabilně, v oblasti od teploty přibližně 15°C do tlaku 10 barů je závislost tlaku na teplotě exponenciální. Při tlaku vyšším než 10 barů dochází ke strmému lineárnímu vzrůstu tlaku i teploty. Strmost těchto křivek může být ovlivněna teplotou okolí a případným chlazením. Při tomto měření byla teplota okolí $\vartheta = 22,1^\circ\text{C}$ a nebylo použito žádné metody nuceného ochlazování.



Obrázek 7.8 Závislost tlaku v úložišti na teplotě úložiště při vybíjení

Závislost na obrázku 7.8 potvrzuje teoretické předpoklady a to, že při vybíjení nádoby dochází zpočátku k prudkému ochlazení úložiště a poklesu tlaku. Při delším vybíjení docházelo v průběhu měření ke stabilizaci teploty úložiště na hodnoty mezi 14 – 15°C a v důsledku toho i ke zmírnění poklesu tlaku. Závislost je možné ovlivnit množstvím uloženého vodíku a také teplotou okolí či případným zahříváním. Při tomto měření byla teplota okolí $\vartheta = 22,1^\circ\text{C}$ a nádobě nebylo dodáváno teplo (nebyla zahřívána).

7.4 Celková účinnost vodíkového systému

Jak již bylo v práci dříve zmíněno bylo provedeno měření zahrnující celý sestavený vodíkový systém a to od výroby vodíku přes jeho ukládání, využití v palivovém článku pro výrobu elektrické energie a její spotřebu pomocí elektronické zátěže ITECH IT8511, která v tomto případě nahrazuje spotřebič.

Účinnost systému lze spočítat jako poměr energie získané ku energii dodané.

$$\eta = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}}, \quad (7.3)$$

Dodaná energie do systému byla měřena měřičem spotřeby STEINNER ENM 100. Předpokladem výpočtu je ustálení teploty úložiště po nabíjení a po vybíjení. Při zahájení nabíjení byla teplota úložiště 21,2°C a tlak v úložišti 3,85 barů. Po ukončení nabíjení trvajícím 90 minut byla teplota úložiště 38,62°C a tlak při této teplotě byl 15,35 barů. Po ustálení teploty na 21,2°C poklesl tlak na 5,13 barů. Celková dodaná energie do systému $E_{in} = 1250$ Wh. Hodnota dodané energie obsahuje i energii potřenou pro měřící a ovládací soustavu a zahrnuje také energii potřebnou pro řídicí jednotku palivového článku.

Po ustálení teploty po nabití bylo zahájeno vybíjení úložiště a spotřebovávání vodíku v palivovém článku pro výrobu elektrické energie. Vybíjení probíhalo až do okamžiku než tlak v úložišti poklesl na počáteční hodnotu před začátkem nabíjení. Celková změřená výstupní energie $E_{out} = 116$ Wh.

Dosazením číselných hodnot do vzorce (7.3):

$$\eta = \frac{116}{1250} = 0,0928. \quad (7.4)$$

Celková vypočtená hodnota účinnosti vodíkového systému je 9,28%.

7.5 Návrh provozního režimu

Vytvořený vodíkový systém lze provozovat ve dvou základních režimech. První možností provozu je nabití metalhydridového úložiště vodíkem pomocí elektrolyzáru a jeho následná spotřeba v palivovém článku. Druhou možností provozu je částečně nabití úložiště a provoz palivového článku zároveň s elektrolyzárem. Měření je pro oba režimy provozu možné realizovat pomocí vytvořeného programu a elektronické zátěže. Spotřeba demineralizované vody v elektrolyzáru byla přibližně 0,1 litru za hodinu provozu. Aby nedošlo k poškození elektrolyzáru, je nutno průběžně pozorovat hladinu vody a případně ji doplnit, doplnění je možné provádět i za chodu.

7.5.1 Režim nabití a následného vybití

Jak již bylo avizováno, jedná se o provoz, kdy funguje buď jen elektrolyzátor nebo pouze palivový článek.

V případě že je v provozu elektrolyzátor jedná se o fázi dobíjení. Pro zahájení této fáze je potřebné otevřít úložiště a následně spustit generování vodíku a otevřít elektromagnetický ventil před nádobou. Spuštění generování vodíku lze provést pomocí přidržení tlačítka na elektrolyzátoru po dobu tří vteřin, následně dojde k ohřevu vody v elektrolyzátoru a tlakování elektrolyzátoru vodíkem, součástí elektrolyzátoru je sušička, která zvyšuje čistotu vodíku na požadovaný stupeň čistoty. Po pěti minutách započne elektrolyzátor dodávat vodík do úložiště. Dodávané množství nelze z důvodu nekomunikace s elektrolyzátorem nijak regulovat, bylo tedy předpokládáno, že je produkováno maximální množství 100 litrů za hodinu. Přibližně dvě hodiny po spuštění generování dochází k přerušení dodávky vodíku z důvodu zvýšené teploty elektrolyzátoru, po poklesu teploty se dodávka vodíku samovolně obnovuje. Po nabití nádoby na požadovanou hodnotu tlaku je nutno ručně elektrolyzátor vypnout a následně zavřít elektromagnetický ventil.

Vyrobený vodík je možné začít z úložiště ihned spotřebovávat v palivovém článku. Pokud by bylo nutné odebírat z nádoby větší množství vodíku v krátkém časovém úseku je výrobcem doporučeno nádobu zahřívat a tím dodávat metalhydridu potřebné teplo pro vylučování atomů vodíku.

7.5.2 Kontinuální provoz elektrolyzátor – palivový článek

V tomto režimu provozu se všichni elektrolyzátor vyrobený vodík okamžitě spotřebovává v palivovém článku. Vzhledem k tomu, že palivový článek neodebírá potřebný vodík kontinuálně, ale odebírá ho nárazově jednou za deset vteřin, tak nádoba funguje v tomto režimu podobně jako akumulátor. Pokud palivový článek vodík neodebírá je nádoba dobíjena, naopak pokud článek vodík odebírá tak je odebírán jak z elektrolyzátoru, tak z úložiště. Nádoba tedy slouží pro vykrytí špiček ve spotřebě vodíku.

Před zahájením provozu je nutné nádobu částečně naplnit vodíkem, a to z důvodu možného přerušení výroby vodíku, kvůli přehřátí elektrolyzátoru. Měřením bylo zjištěno že kontinuální provoz, tedy vodík vyrobený během deseti vteřin je i jednou za tento interval palivovým článkem spotřebován a tedy že výroba je rovna spotřebě vodíku, je možný, konkrétně pro hodnotu výkonu odebíraného z palivového článku $P \approx 100 \text{ W}$. Pokud je odebíraný výkon nižší než tato hodnota, dochází k dobíjení úložiště, pokud je odebíraný výkon vyšší, elektrolyzátor nestíhá vodík dodávat a dochází k vybíjení nádoby.

8. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zpočátku zaměřena na metody výroby vodíku a to jak ze zdrojů obnovitelných, tak i neobnovitelných, bylo provedeno jejich základní rozdělení a zmíněny jejich výhody a nevýhody, jako například efektivita procesů nebo vlivy na životní prostředí.

Dále se práce zabývá elektrolýzou vody, byl vysvětlen její základní princip, rozdělení a využitelnost v kombinaci s obnovitelnými zdroji elektrické energie. Byly představeny čtyři základní typy technologií elektrolýzy, tři nízkoteplotní a jedna vysokoteplotní, každá z nich pracuje na jiném principu, jsou v nich využívány odlišné materiály elektrod, membrán nebo i jiné složení elektrolytů, pro každou představenou technologii jsou uvedeny rovnice chemických reakcí pro katodu a anodu a sumární reakce kompletního článku. Pro elektrolýzer s polymerní membránou byla více přiblížena problematika termodynamiky.

Je zde podrobněji představena technologie AEM. Jedná se o technologii spojující výhody alkalické elektrolýzy a elektrolýzy s polymerní membránou, především se snaží omezit využití drahých a vzácných kovů, to je umožněno zásaditým elektrolytem.

V práci jsou také zmíněny možnosti ukládání vyrobeného vodíku, představeny byly jak konvenční metody jako ukládání plynného vodíku v tlakových lahvích nebo kapalného vodíku v kryogenních zásobnících, tak i metody alternativní. Zaměření bylo směřováno především na metody alternativní, konkrétně na metodu ukládání vodíku v metalhydridech, neboli strukturách kovu.

V kapitole o metalhydridech jsou zmíněny vlastnosti těchto látek, využívané materiály a princip funkce ukládání do struktury krystalické mřížky kovu. Dále je představen směr jejich vývoje, aby bylo možné zlepšit jejich vlastnosti, především se pak výzkum zaměřuje na snižování hmotností tohoto typu úložišť.

V rámci praktické části byl sestaven kompletní funkční vodíkový systém obsahující elektrolýzer využívající technologii AEM, metalhydridové úložiště vodíku palivový článek. Dále byla zapojena ovládací a měřicí soustava, měření je zprostředkováno pomocí měřicí ústředny Agilent 34972A a elektronických senzorů, naměřené hodnoty jsou zobrazovány a zapisovány do MS Excel pomocí vytvořeného programu. Aktuální nastavení měřicích intervalů není ideální, ale jedná se o kompromis s funkčností, a tím i správným načítáním a zapisováním hodnot.

Z naměřených dat a vytvořených závislostí lze vyvodit závěr, že tlak v metalhydridových úložištích je silně závislý na teplotě nádoby, také byly potvrzeny teoretické předpoklady zahřívání nádoby při nabíjení vodíkem a její ochlazování při odebírání vodíku z úložiště, oba jevy jsou ovlivněny teplotou okolí a také dodávaným, respektive odebíraným množstvím vodíku. Bylo zjištěno, že pokud je nádoba dlouhodobě vybíjena dochází ke stabilizaci teploty a pouze pozvolnému poklesu tlaku. Teplota na kterou se úložiště stabilizuje je závislá na teplotě okolí.

Pomocí metody popsané v kapitole 7.4 byla stanovena celková účinnost, jako poměr energie dodané do systému pro výrobu vodíku, ovládání a měření, a energie dodané systémem – palivovým článkem. Vzhledem k degradaci palivového článku, je jeho výkon přibližně poloviční než u nového zařízení, maximální výkon článku dosahoval stabilně hodnoty 106 W, nové zařízení tohoto typu má výkon 200W. I proto je celková účinnost vytvořeného systému nízká a dosahuje pouze hodnoty 9,28%.

Součástí práce jsou také dva navržené režimy provozu. V případě prvního režimu se jedná o dobíjení metalhydridového úložiště na požadovanou hodnotu pomocí elektrolyzáru a následné vybití úložiště pomocí palivového článku. Za provozu tímto režimem byly změřeny závislosti tlaku na teplotě úložiště při nabíjení a vybíjení. Druhý představený režim uvažuje kontinuální provoz, při kterém je vyrobené množství vodíku v určitém intervalu okamžitě spotřebováno palivovým článkem. V tomto režimu funguje úložiště jako akumulátor vodíku pro případné vykrývání přebytku či nedostatku vodíku generovaného elektrolyzárem. Ideální rovnováha, tedy vyrobené množství vodíku je rovno spotřebovanému, nastává při odebíraném výkonu z palivového článku $P \approx 100 \text{ W}$. V obou navržených režimech je elektrolyzář provozován na plný výkon, dodává tedy maximální možné množství vodíku 100 litrů za hodinu a to při spotřebě demineralizované vody 0,1 litru za hodinu.

LITERATURA

- [1] TKÁČ, M. a K. STEHLÍK. Centrální výroba vodíku. Chemické listy [online]. 2017, 111(2), 121-128 [cit. 2020-10-28]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_02_121-128.pdf
- [2] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. Materials Science for Energy Technologies [online]. 2019, 2(3), 442-454 [cit. 2020-10-29]. ISSN 25892991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [3] Michael Faraday. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday
- [4] Michael Faraday. In: conVERTER [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/fyzici/faraday.htm>
- [5] Elektrolýza. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrolýza#Faradayovy_zakony_elektrolýzy
- [6] Faradayovy zákony. In: Elektřina a magnetismus [online]. 2004 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/elektrina/el_proud/vedeni_proudu/kapaliny/far_zak.html
- [7] Využití vodíkových technologií v energetice. In: Allforpower.cz [online]. 2020 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologii-v-energetice-228>
- [8] KADIER, Abudukeremu, Mohd Sahaid KALIL, Peyman ABDESHAHIAN, et al. Recent advances and emerging challenges in microbial electrolysis cells (MECs) for microbial production of hydrogen and value-added chemicals. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2016, s. 501-525 [cit. 2020-11-7]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.04.017
- [9] AEM Technology. In: Enapter Handbook [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://handbook.enapter.com/knowledge_base/aem_technology.html
- [10] WANG, Jingwen. AEM water electrolysis: how it works. In: Enapter [online]. 2020, 20.10.2020 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.enapter.com/aem-water-electrolysis-how-it-works>

- [11] Technical datasheet: ACTA EL100c-250c [online]. Crespina [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.actaspa.com/products/el100c-250c/>
- [12] Skladování vodíku. In: HydroRACE4School [online]. 19.10.2019 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.hydro-race.eu/Skladování-vodíku>
- [13] Skladování vodíku I. In: Česká vodíková technologická platforma [online]. c2020, 17.květen 2007, [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i%C2%A8>
- [14] Skladování vodíku II. In: Česká vodíková technologická platforma [online]. c2020, 29. květen 2007 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [15] ABE, J.O., A.P.I. POPOOLA, E. AJENIFUJA a O.M. POPOOLA. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. International Journal of Hydrogen Energy [online]. 2019, 44(29), 15072-15086 [cit. 2020-12-16]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
- [16] HELIOCENTRIS. Metal Hydride Canister [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://eif-wiki.feit.uts.edu.au/_media/technical:renewables:metal_hydride_canister_en_1101.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

| | |
|------------------|--|
| DC | <i>direct current</i> (stejnoseměrný proud) |
| AC | <i>alternating current</i> (střídavý proud) |
| AWE | <i>Alkaline Water Electrolysis</i> (elektrolýza s alkalickým elektrolytem) |
| SOE | <i>Solid Oxide Electrolysis</i> (elektrolýza s membránou z pevných oxidů) |
| MEC | <i>Microbial Electrolysis Cell</i> (mikrobiální elektrolytický článek) |
| PEM | <i>Proton Exchange Membrane</i> (elektrolýza s polymerní membránou) |
| AEM | <i>Anion Exchange Membrane</i> (elektrolýza s anionovou membránou) |
| CGH ₂ | <i>Compressed Gaseous Hydrogen</i> (stlačený plynný vodík) |
| LH ₂ | <i>Liquid Hydrogen</i> (kapalný vodík) |

Symboly:

| | | |
|-------------|--|-------------------------------------|
| m | hmotnost | (kg) |
| A | elektrochemický ekvivalent látky | (kg.C ⁻¹) |
| I | proud | (A) |
| Q | elektrický náboj | (C) |
| M | molární hmotnost | (kg.mol ⁻¹) |
| F | Faradayova konstanta, {F}=9,6485.10 ⁴ | (C.mol ⁻¹) |
| z | počet elementárních nábojů | (-) |
| ϑ | teplota | (°C) |
| p | tlak | (Pa) |
| ΔG | Gibbsova volná energie | (kJ.mol ⁻¹) |
| n | počet elektronů účastnících se reakce | (-) |
| U_{rev} | reverzibilní napětí | (V) |
| Δi | změna entalpie vody | (kJ.mol ⁻¹) |
| U_{TN} | termoneutrální napětí | (V) |
| η | účinnost | (-) |
| U_{el} | napětí článku elektrolyzéru | (V) |
| ρ_v | objemová kapacita | (kgH ₂ /m ³) |
| ρ_m | hmotnostní kapacita | (%) |

Chemické prvky, sloučeniny a ionty:

| | |
|--------------|-----------------------------|
| e^- | elektron |
| H^+ | vodíkový iont |
| OH^- | hydroxylový iont |
| O^{2-} | kyslíkový iont |
| CH_3COO^- | octanový iont |
| HCO_3^{3-} | uhličitanový iont |
| H_2O | voda |
| CO | oxid uhelnatý |
| CO_2 | oxid uhličitý |
| O_2 | kyslík v molekulární podobě |
| H_2 | vodík v molekulární podobě |
| NH_3 | amoniak |
| Pt | platina |
| Pd | palladium |
| IrO_2 | oxid iridičitý |
| RuO_2 | oxid rutheničitý |
| KOH | hydroxid draselný |
| Ca | vápník |
| Ti | titan |
| Y | yttrium |
| Zr | zirkonium |
| Hf | hafnium |
| La | lanthan |
| Ce | cesium |
| Cr | chrom |
| Mn | mangan |
| Fe | železo |
| Co | kobalt |
| Ni | nikl |
| $LaNi_5$ | slitina lanthanu a niklu |
| $FeTi$ | slitina železa a titanu |
| $NaAlH_4$ | tetrahydridohlinitan sodný |
| MgH_2 | hydrid hořčíku |
| $NaBH_4$ | tetrahydridoboritan sodný |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|--|----|
| PŘÍLOHA A - ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY | 51 |
|--|----|

Příloha A - Elektronické přílohy

Seznam souborů na přiloženém CD:

- LabVIEW_projekt_H2_system
 - zdrojový kód se všemi nezbytnostmi
- H2_system_v1.5
 - samostatný stand-alone program
- Hodnoty_závislosti
 - naměřené hodnoty a vytvořené závislosti